

レアメタル——資源の現況と今後の活用法



岡^{おか}
部^べ
徹^と
おる

要 旨

レアメタルは資源の枯渇や地理的偏在が不安視されているが、枯渇を危惧する懸念はない。むしろ、採掘・製錬技術の限界や各国の環境規制の差のために供給国が偏り、その結果、レアメタル輸入国は供給障害の危険に晒され、輸出国は環境破壊が深刻化していることが問題である。レアメタルのリサイクルが、今後ますます重要になる。

はじめに

一九八四年、私は京都大学工学部でも人気のない冶金学科に進学し、中でも人気のない製錬の、更に人気のない非鉄冶金の、その中でも特に人気のない特殊金属製錬の、超マイナーなチタン精錬の研究を卒業テーマ

マとして与えられました。その後、京都大学で博士号を取得し、MIT（博士研究員）、東北大学（助手）、東大（助教授、准教授、教授）と各地を三十年以上にわたって転々としながら、レアメタルの研究を続けてきました。

専門は、循環資源と材料プロセス工学です。具体的には、①チタンなど新素材の製造プロセスの開発、②電子材料用のレアメタル（ニオブ、タンタルなど）の製錬、③レアメタルのリサイクル技術の開発です。

資源や鉱山開発にも興味があり、世界中の珍しい鉱山と製錬所を訪ねるのが仕事です。

昔は「レアメタルが専門です」と言っても誰もその研究の意義を理解してくれませんでした。それどころか、レアメタルというと、三面記事のネタである「インサイダー取引」「詐欺」「環境破壊」「鉱山事故」「毒物垂れ流し」などが連想され、悪いイメージしかありませんでした。

しかし二〇〇六年頃から風向きが変わりました。二〇〇六年九月八日、日経新聞朝刊一面トップに「レアメタル、安定供給へ備蓄増強」という記事が掲載され、二〇一二年十月十日には「レアアース、脱中国進む」という記事が掲載されたのです。後者は中国がレアアースの対日輸出を禁止し、日本中がパニックになったことがきっかけで大きなニュースとなっていたため、ご記憶の方も多いでしょう。

このようにかつて不人気だったレアメタルも、今や大きく注目されています。こうした経緯から、私は学生たちに、「今、人気のiPSや免疫研究はテーマと

して選ぶな。研究は、今は誰もが見向きもしない独自の道を進め」と言っています。

レアメタルとは何か

鉄、銅、鉛、亜鉛、銀、アルミニウムなどは広く普及し日常的に利用されている汎用金属で、「ベースメタル」「コモンメタル」と呼ばれています。これら以外の金属は「レアメタル」です。

周期表（図1）で背景がグレーになっている元素がレアメタルです。多数のレアメタルの中で、一部のグループが「レアアース（希土類）」と呼ばれ、これらは全部で十七個の元素の集合です。

レアメタルとは、定義では、①埋蔵量が少なく、資源的に希少な金属（白金族、インジウム、ガリウム、タリウム、ジスプロシウム、レニウムなど。周期表の下方の元素）、②資源は豊富だが、メタルを得るのが困難な金属（チタン、シリコン、マグネシウムなど。周期表の上方の元素）、③資源は豊富だが、鉱床の品位（ $\parallel$ 金属の含有率）が低い金属（スカンジウム、バナジウムなど）となります。

④高純度等、特異な形態で優れた機能を発揮する元素（超高純度鉄、高純度非鉄金属など）、⑤少量・微量で特異な機能を発揮する元素（高付加価値を實現で

そもそも、レアメタルとは・・・

The Periodic Table of the Elements																	
I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B		I B	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	
Hydrogen 1 1.008																Helium 2 4.003	
1H																2He	
Rare Metals																Elements studied at Okabe lab.	
Lithium 3 6.941	Beryllium 4 9.012																
3Li	4Be																
Rare Metals (Broad category)																	
Sodium 11 22.99	Magnesium 12 24.31																
11Na	12Mg																
Potassium 19 39.10	Calcium 20 40.08	Scandium 21 44.96	Titanium 22 47.87	Vanadium 23 50.94	Chromium 24 52.00	Manganese 25 54.94	Iron 26 55.85	Cobalt 27 58.93	Nickel 28 58.69	Copper 29 63.54	Zinc 30 65.39	Gallium 31 69.72	Germanium 32 72.61	Arsenic 33 74.92	Selenium 34 78.96	Bromine 35 79.90	Krypton 36 83.80
19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr
37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe
85.47	87.62	88.91	91.22	92.91	95.94	(98)	101.1	102.9	106.4	107.9	112.4	114.8	118.7	121.8	127.6	126.9	131.3
Cesium 55 132.9	Barium 56 137.3	Lanthanum 57 138.9	Hafnium 58 178.5	Tantalum 59 180.9	Tungsten 60 183.8	Rhenium 61 186.2	Osmium 62 190.2	Iridium 63 192.2	Platinum 64 195.1	Gold 65 197.0	Mercury 66 200.6	Thallium 67 204.4	Lead 68 207.2	Bismuth 69 209.0	Poisonum 70 (210)	Antimony 71 (210)	Radon 72 (222)
55Cs	56Ba	71La	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn
Francium 87 (223)	Radium 88 (226)	Lanthanum 89 (227)	Protactinium 90 (231)	Uranium 91 (238)	Neptunium 92 (237)	Plutonium 93 (244)	Americium 94 (243)	Curium 95 (247)	Berkelium 96 (247)	Californium 97 (251)	Einsteinium 98 (252)	Fermium 99 (257)	Mendelevium 100 (258)	Nobelium 101 (259)			
87Fr	88Ra	101La	102Hf	103Db	104Sg	105Bh	106Hs	107Mt									
(223)	(226)	(227)	(231)	(238)	(237)	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)			
Lanthanide	57La 138.9	58Ce 140.1	59Pr 140.9	60Nd 144.2	61Pm (145)	62Sm 150.4	63Eu 151.9	64Gd 157.3	65Tb 158.9	66Dy 162.5	67Ho 164.9	68Er 167.3	69Tm 168.9	70Yb 173.0			
	Lanthan	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium			
Actinide	89Ac 227.0	90Th 232.0	91Pa 231.0	92U 238.0	93Np (237)	94Pu (239)	95Am (243)	96Cm (247)	97Bk (247)	98Cf (251)	99Es (252)	100Fm (257)	101Md (258)	102No (259)			
	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium			

図1 元素の周期表の中で、ほとんどの元素がレアメタルである。

レアメタルの資源の状況

枯渇の可能性はないが、供給障害の可能性は大きい

レアメタルの生産と供給には、①資源供給制約、②技術制約、③環境制約があります（図2）（引用文献1）。①は埋蔵量が少ないことや地理的に偏在していること、②は採掘技術に限界があり、深い地底や海底の資源を利用する技術、品位の低い鉱物を利用する技術、リサイクル技術、有害物の処理技術などが開発されていないこと、③は先進国の環境規制が厳しいことを指します。

レアメタルというと、「希少金属→枯渇」というイメージ

（6）これまで用途が少なく、工業的には未開発の元素（オスミウム、アクチノイド、超高純度金属など）という定義が加わることもあります。

①資源供給制約 (Resource Supply Restriction) → この項目のみがメディアでは注目され、②技術制約や③環境制約については、あまり報道されない。（企業も②と③については、報道されたら困る場合が多い）

②技術制約 (Technological Restriction)

③環境制約 (Environmental Restriction)

図2 レアメタルの生産と供給に関するボトルネックについて考えるにあたって、考慮しなければならない主な項目

ジから、日本では多くの場合、①の資源供給制約だけが注目されて議論されていますが、それは間違いです。今、採掘している特定の優良な鉱山が枯渇することとはあっても、世界的にみれば、レアメタルそのものが枯渇する可能性は全くありません。

しかし、レアメタルは、その供給源の偏在性から、明日にでも供給障害に陥る可能性があります。レアアースは中国に、白金族金属は南アフリカとロシアなど、ごく少数の国が世界の供給の八〇九割を独占しているからです。とはいえ、白金族金属以外は、資源が偏在しているとは言えません。ほとんどのレアメタルは世界中に豊富に存在しているものの、低いコストで採掘できる鉱山が一部の国に偏在していることが問題です。

レアアースを例に説明しましょう。中国は、年間約十万吨のレアアースを生産し、世界の供給シェアの八五%以上を独占していますが、レアアース自体は世界中の陸上に、発見されているだけで一億三千万トン（世界需要の千年分）存在しています。「日本近海海底で大量のレアアース発見」と報道されましたが、陸上資源だけでもほぼ無尽蔵です。したがって、海底資源を利用する必要性は、現時点ではありません。

レアアースは一九八〇年頃までは大半を米国が生産

し、中国はほとんど生産していませんでした。しかし、二〇〇〇年頃から中国が供給の大半を担うようになり、米国は鉱山休止に追い込まれました。これは米国のレアアースの鉱山の資源が枯渇したからではなく、米国の環境規制が強化され、採掘・製錬コストが上昇したため、ビジネスとしての競争力が低下したからです。一方、中国では極めて低い環境コストで採掘や製錬を行えるので、他国の鉱山が競争力を失ったのです。その結果、レアアースの供給は著しく中国に偏ることになり、中国が輸出禁止措置を取ると、日本の産業は供給障害でパニックに陥る事態になりました。

つまり、レアメタルの供給障害のリスクは、（図2の）①の資源の枯渇が制約となっている事例より、②の採掘・製錬の技術や、③の環境規制が制約となって供給国が偏り、そこに政治問題や外交問題が絡んで生じる事例が多いのです。しかし、企業にとっては「真実」が報道されると困る場合もあるのかもしれない。このためでしょうか、②や③は日本ではほとんど報道されません。

なお、私個人は資源の偏在については、白金族金属とタングステン（タングステン）の心配をしています。白金（プラチナ）やパラジウムは南アフリカとロシアに、タングステン（タングステン）は中国に鉱山が偏在しています。南アフリカは自

由貿易国なので無茶はしないでしようが、中国やロシアが牛耳っているレアメタルについては、備蓄とリサイクルを心掛けるべきです。白金やパラジウムなどの白金族金属は、今後百年以上も採掘可能な鉱山が存在するのですが、鉱石の品位が低く採掘と製錬に多大なコストがかかり、年間生産量が非常に少ない点も心配です。ただし、いずれのレアメタルも埋蔵量は十分あります。

レアメタルは豊かな生活に不可欠である

現在の自動車や飛行機には、その部材や制御・計測用電子機器などに多種多様なレアメタルが使われています。自動車は今や「走るレアメタル」、飛行機は「空飛ぶレアメタル」と呼ばれています。スマートフォンやコンピュータなどの電子機器（半導体、電子材料）、原子力発電所や太陽光発電装置（バッテリー、変換、送電）も、レアメタルの塊です。合金や医療（生体材料・医薬品・健康食品）にもレアメタルは使われています。

具体的には、レアアースは強力な磁石の材料であり、レアアースを含む磁石は、ハードディスク、携帯電話のバイブレータ、ハイブリッド車や電気自動車のモーターに使われています。白金族金属はガソリン車

の排ガス浄化触媒や燃料電池の触媒などに使われています。インジウムは液晶やプラズマの透明電極に、ガリウムは青色発光ダイオードに、タンタルは小型高性能コンデンサーに使われています。

今後、ハイテク機器の高機能化がさらに進むと、レアメタルの利用はますます多様化します。あまり知られていませんが、日本は最先端素材・レアメタルの開発と供給の分野で、トップランナーです。

工場のゴミゼロ化は、本当に環境に優しいのか？

近年、先進国のメーカーは自社の環境保護への取り組みとして、「工場のゴミゼロ化運動」や「CO₂削減」や「省エネ」を喧伝しています。一例をあげると、アップル社は、「iPhoneで使用するアルミニウムは、水力による電力を利用して作るため、製造過程でのCO₂の発生量が低く抑えられています」と宣伝しています。また、日本の一部の企業は、「我が社の工場からは、ゴミを出さずにハイテク・省エネ製品を製造している」と自慢しています。

先進国の消費者の多くも、こうしたハイテク・省エネ製品を享受しながら、「私は環境に貢献している」と信じています。しかし、ここには大きなからくりが隠されています。

自動車为例に説明しましょう。電気自動車一台を製造するには約五十kgの銅が必要です。銅鉱石の品位は約〇・五%なので、約十トンの銅鉱石が必要なのは明らかですが、銅の抽出後、残りの約十トンは全てゴミになります。そのほとんどが鉱山周辺で処分されています。しかもこのゴミには、ヒ素などの有害物質が含まれている場合があります。高性能モーターの製造にも、ネオジムなどのレアアースが必要です。これを鉱石から抽出する際も、ウラン、トリウムなどの放射性物質を含んだ廃棄物が大量に発生します。ガソリン車の場合、排ガス浄化触媒として白金族金属が使われます。自動車一台あたりの使用量は数gですが、鉱石の品位はppmオーダー（百万分の一程度）と低いので、自動車一台につき数トンのゴミ（廃棄物）が、白金族金属を使うだけで発生します。

このように、車一台分の原材料を調達するためだけでも、天然鉱物の採掘と製錬の過程で莫大なエネルギーが消費され、大量の有害物質を含む廃棄物が発生しています。ハイテク製品が生産されると同時に、私たちが目にするところがないところで、深刻な環境破壊が起きているのです。

先進国の企業は、採掘と製錬の過程を全て途上国に任せ、環境負荷を全て途上国に負わせています。しか

しながら、一般の人がそれを知らないことにつけ込んで、環境破壊の実態には類かむりして、有害物を取り除いた後の綺麗な原材料を輸入しています。こうした仕組みで、国内のハイテク工場でゴミの発生を徹底的に減らして「環境に優しい」と謳っているのです（引用文献2）。

近年ではオーストラリアで採掘したレアアースの鉱石を、放射性物質を処理する社会システムと技術を持つマレーシアに持ち込んで精錬し、有害物を除去した後、高純度になったレアアースだけを日本に輸入する動きがあります。

この一連の過程は、どれも違法ではありません。中国のみに依存していた供給リスクを回避し、さらにマレーシアに高純度化と廃棄物処理を任せることで、オーストラリアや日本の厳しい環境規制を回避する、これは「賢いビジネスモデル」と言えます。しかし、このモデルが本当に環境に優しいと言えるでしょうか。

レアメタルをコモンメタルへ

〜新素材チタン（レアメタル）のプロセス研究

図3（巻頭カラー）は、一八五八年に皇帝ナポレオン三世に贈られた彫像です。驚くことに、これはアルミニウム製です。

アルミニウムは剣などの刃物としては脆弱ですが、盾やヘルメットにすると軽くて強くて輝きもあるので、相手の戦意を喪失させるハイテク軍事物質として皇帝にも愛されました。その昔は、貴金属よりも高価であつた時代もあつたようです。

アルミニウムはその後、製錬法の技術革新によりコモンメタルになりましたが、百二十年前は貴重なレアメタルであつたのです。つまり現在のレアメタルも、採掘・製錬技術やリサイクル技術が進歩すれば、コモンメタルに変わる可能性があります。

私はよく高校に出張授業に出かけるのですが、高校生はアニメ好きが多いので、授業の最初に「機動戦士ガンダムと浅草寺の共通項は何だと思う？」と尋ねます。生徒たちは、最初はきょとんとしています。ヒントとして航空機と羽田沖D滑走路を挙げると、「チタン」と正しく答えます。羽田沖D滑走路の棧橋部の天井面には、錆びないように合計千トンの薄いチタンが貼られています。

初代ガンダムはガンダリウム合金製です。これは、宇宙世紀〇〇六四年に開発された（ルナ）チタンとアルミニウムとレアアースの合金で、月（ルナ）で精製されたという設定です。

浅草寺の本堂や宝蔵門や五重塔の屋根瓦（図4・巻

頭カラー）は、昔は重い焼き物で作られていましたが、今は厚さ〇・三mmの薄いチタン薄板を使った超軽量・ハイテク瓦です。チタン製ですの、軽くて強く、耐蝕性が抜群です。ただし、チタン製では仕上がりが均一で一定になり、焼きムラがある本物の焼き物の瓦に見えませんが、そこでブラスト（表面研磨）処理を行なつて、わざと色調を変化させて、焼きムラの風合いを加え、本物の重たい瓦のように見せかけています。チタンの薄板は踏むと凹むので、へこまないように中に木材を入れて補強してあります。

金閣寺の茶室の屋根もチタンできています。また、北野天満宮の屋根も、外見は、銅の板を屋根に葺いたように見えますが、緑青色のチタン薄板で作られているそうです。銅は加工と溶接がしやすく、チタンと比べて安価ですが、少しづつ腐蝕するので、約五十年に一度葺き替える必要があります。また、焼き物の瓦は重いので地震の時に危険です。これに対し、チタンは抜群の耐蝕性を有し、半永久的に永持ちし、軽いので地震時の危険性も大幅に軽減されます。

フジテレビ本社ビルや東京ビッグサイトの外壁もチタン製です。その他、ゴルフのヘッド、自転車、航空機、ロケット、化学プラント、深海調査船、熱交換器、医療材料（人工骨など）にも用いられています。

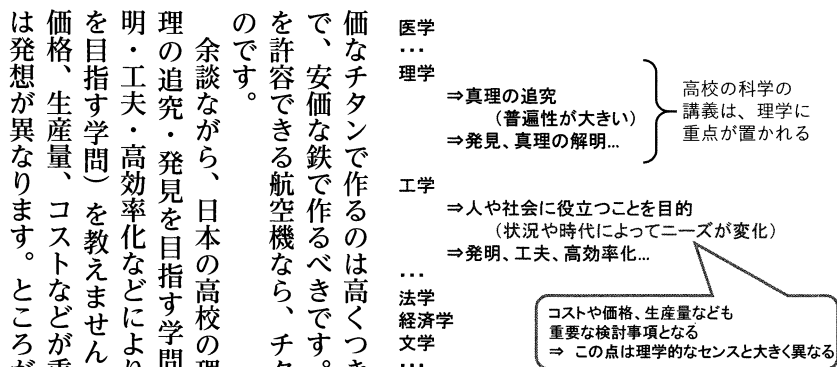


図5 理学と工学の違い

価なチタンで作るのは高くつき過ぎて割に合わないの
で、安価な鉄で作るべきです。逆に、高い素材コスト
を許容できる航空機なら、チタンをふんだんに使える
のです。

余談ながら、日本の高校の理科教育では、理学（真
理の追究・発見を目指す学問）を重視し、工学（発
明・工夫・高効率化などにより、社会の役に立つこと
を目指す学問）を教えません（図5）。工学分野では
価格、生産量、コストなどが重要で、理学的センスと
は発想が異なります。ところが、この分野は普遍性が

新素材の普及を
考える時、重要な
のは素材の製造コ
ストです。例えば
鉄は1kgあたり五
十円、チタンは三
千円です。一方、
自動車の価格（一
kgあたりに換算）
は数千円、航空機
は約二十万円で
す。つまり、現時
点では自動車を高

無いため、高校の先生が教えることができません。こ
のため、高校生たちは、工学部への進学を躊躇するこ
とがあるようです。日本は、工学分野で世界をリード
していることが多いので、是非、工学部に進学して欲
しいものです。

話を戻します。私は先に紹介しましたようにチタン
の製造プロセスの研究にも取り組んでいます。日本は
チタン製造の超大国で、世界の二〇～三〇%の生産シ
ェアを占めています。チタンは現時点ではレアメタル
ですが、イノベーションにより将来はコモンメタルに
なる可能性が高いので、チタンの新製造プロセスの研
究開発とレアメタルの普及に努めたいと思っています。

世界のレアメタルの採掘現場を訪問

アウトドアが好きな私は、趣味と研究を兼ねて世界
中のレアメタルの鉱山や製錬所を訪問しています。現
場に行くと、レアメタルの鉱床の多くが「地球が生ん
だ奇跡」であると実感できます。一方で、採掘と製錬
により貴重な自然が破壊され、大量のエネルギーが消
費されている現実を目の当たりにするにつけ、野外活
動を趣味とする者として心が痛みます。

①チリ（銅）

チユキカマタ鉱山は、縦5km、横10km、深さ5km

で、世界最大級の露天掘り鉱山です。チュキカマタの町は銅の生産によって大変繁栄していましたが、塵肺被害が問題となり、何年か前に、全住民が近隣のカラマという町に移住しました。今はゴーストタウン化して、産業遺産として保存されています。チリの銅精錬関係者の多くは、今は裕福なので、自家用車で鉱山や製錬所に通勤しています。

豊かになったチリではその後、環境技術が発達し、健康被害が激減しましたが、例えばボリビアの鉱山では、今でも手掘りで採掘しているところがあり、健康被害が深刻です。大企業が関与する鉱山は環境や健康に配慮していますが、地元の個人事業主が運営する小さな鉱山における環境対策は杜撰です。例えば、金を抽出する最も簡単な方法は水銀を使うことですが、その水銀を平気で川に垂れ流す鉱害が今でも海外では起こっています。

②米国・アリゾナ（銅）

米国は環境規制が厳しいのですが、アリゾナのモレンシー鉱山では山に直接、硫酸をかけて採掘しています。砂漠地帯で、川に重金属が流出することはありません。また近くには住民がいないため、健康被害が出ないからです。鉱山の下に硫酸酸性の硫酸銅水溶液の池ができるので、この水溶液中の銅を濃縮し、電解採取（電

気分解）して金属銅を生産しています（湿式製錬。後述）。

③ブラジル（ニオブ）

ニオブは自動車の高張力鋼を製造する際に合金元素として添加されるレアメタルです。ブラジルのアラシヤ鉱山からの産出量だけで、世界需要の八割強を担っています。また、この鉱山は、四百年分以上の埋蔵量があります。ニオブ製錬の際に排出される放射性元素の処理が問題となることがあります。

④南アフリカ（白金）

南アフリカには、「ブッシュベルト複合岩体」という幅が数百kmもある巨大な白金鉱脈があります。ここでは地下千mまで掘って長い坑道を作り、ダイナマイトを使って採掘しているので、大変な労力です。その上、南アの鉱山の鉱石の白金品位（数ppm）は世界最高ですが、それでも鉱石一トンからパチンコ玉一個分（数g、二万円相当）しか採れず、残りの約一トンは全てゴミになります。このように白金は採掘と製錬の過程で大量のエネルギーを消費し、莫大なゴミを出すので、リサイクルが必須です。

⑤南アフリカ（チタン）

南アフリカでは、巨大な砂山に水をかけるドレッジマイニングという、とても低コストの採掘手法で、チ

タン鉱石を採掘しています。長さが何百kmもつづく巨大な砂山の大きさを考えると、チタンの資源が無尽蔵であることが理解できます。

⑥ オーストラリア（シリカ）

タスマニア島では、ブルドーザーで砂を掘って、これを使って粒度を揃えるだけで、高純度のシリカ（石英）の粉末を採掘しています。液晶パネル向けの需要が拡大しているので貴重な鉱山です。世界には、「地球の奇跡」と思えるような、珍しく高品位の鉱山があるのも不思議です。

⑦ チリ（リチウム）

チリのアタカマ塩原は巨大な塩の塊です。アタカマ塩湖から生産される鉱種は、肥料などに使うリチウムが主です。塩の塊からできた砂漠からは、携帯電話などのバッテリー（蓄電池）に使われるリチウムも採取され、世界の需要の大半を賄っています。地下水を汲み上げ、天日干しにして水分を蒸発・濃縮させるだけで、カリウムやリチウムを極めて低いコストで生産しています。

近くのウユニ塩湖（ボリビア）もレアメタルの宝庫ですが、濃度が低い上に雨が降るので、採掘（天日干し）に向いていません。チリやボリビアの周辺の標高四千m級の山々には、亜鉛や鉛や銀の鉱山が沢山あり

ます。

⑧ コンゴ（タンタル）

「コルタン」という天然鉱石には、電子機器の高性能コンデンサーに使われる「タンタル」というレアメタルが多く含まれています。タンタルは高純度化すると1kg数万円で売られる高価なレアメタルなので、コンゴの人々は、地域によっては子どもまで動員して川底を浚い、採掘しています。タンタル鉱山の利権を巡って政府軍と反政府軍が内戦を繰り返していることでもあるようです。興味深いことに敵対する両者は、ビジネスに関しては手を結び、海外の商社とも連携してタンタルの売買で儲けています。

このように先進国の人々が享受するハイテク機器の原材料として使われるレアメタルを獲得するために、途上国で環境破壊、内戦、児童労働、ゴリラなど野生動物の虐殺（森林伐採や食用とするため）等が起きているのも悲しい現実です。

中国のレアアース鉱山と廃鉱滓処分場を訪問

包頭市（パオトウ）は、中国の内モンゴル自治区にある人口二百五十万人の巨大都市です。Baotou Tailing Damで画像検索すると、多くのショックキングな映像が出てくることから明らかなように、包

頭市の周辺では金属生産のために深刻な環境破壊が起きている。

私は早速、現地に足を運びました。まず包頭市の中心部から百五十kmほど北の白雲鄂博という長閑な村にある、世界最大のレアアース鉱山地帯を訪問しました。

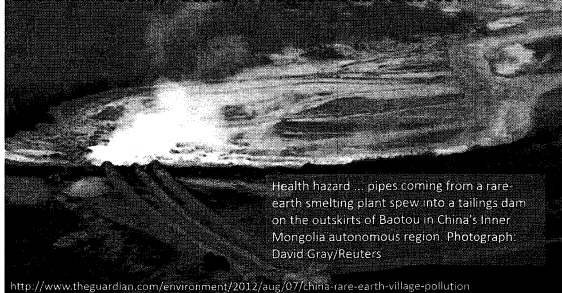
中国北部のレアアース鉱山は露天掘の鉱山で、岩盤が固いのでダイナマイトを仕掛けて鉱石を砕いて採掘しています。

周囲には採掘時に出た廃棄物のボタ山がいくつもあります。このボタ山は、ウラン、トリウムなどの放射性物質も含みます。さらに、工場で製錬し

Rare-earth mining in China comes at a heavy cost for local villages

Pollution is poisoning the farms and villages of the region that processes the precious minerals

Guardian Weekly, Tuesday 7 August 2012 13:59 BST



Health hazard ... pipes coming from a rare-earth smelting plant spew into a tailings dam on the outskirts of Baotou in China's Inner Mongolia autonomous region. Photograph: David Gray/Reuters

<http://www.theguardian.com/environment/2012/aug/07/china-rare-earth-village-pollution>

図6 レアアースの製錬を行う中国では環境破壊が進んでいる

た後の廃水は有害物質を含みますが、これらは近くの巨大な池に排出されています（図6）。この廃水は有害化学物質や放射性物質が濃縮されて含まれている場合もあるので、将来、問題となるかもしれません。

レアアース製錬で発生する廃棄物の処分場（廃鉱滓処分場）が包頭市の近くにもあるので、視察に行きました。驚くことに、有害物を含むゴミが、穴にも埋めずに投棄されていました。これが、中国が世界のレアアース市場を独占できる理由です。

日本は廃棄物処理に関する環境規制が厳格なため、放射性廃棄物を含む廃棄物の処分場をつくる場合、とても高いコストがかかります。現実的には、これらの廃棄物の処分場を日本ではつくれません。しかし、中国は環境コストが極めて低いため、レアアースなどの生産に関してはコスト競争に勝利し、世界の生産シェアを独占できたのです。

中国江西省贛州市のイオン吸着鉱を訪問

自動車用高性能モーターなどの強力磁石の製造に不可欠であるジスプロシウムなどのレアアースは、中国南部にしかないイオン吸着鉱床からの供給に依存しています。ここは雨が多い上に鉱床が地表付近にあるため、長年の風化作用によってトリウムなどの放射性元

素の含有量が少ないのも特徴です。地表近くの土からレアアースを採掘するため、地中に硫酸アンモニウムを直接注入して、土壌のpHを変化させるだけでレアアースが鉱体から溶け出てきます。先に紹介した、アメリカで銅山に硫酸を直接かけて鉱石中の銅を溶解・抽出しているのと原理は同じです。ダイナマイトや重機を使用せずとも、極めて手軽かつ安価にレアアースが採掘できます。「レアアース」「環境」「汚染」などで検索すると、ここの鉱床の画像が沢山出てきます。中国では、採掘後、環境修復にコストをかけない場合が多く、土壌流出や有害物質を含めた廃棄物の不法投棄が進み、環境破壊が深刻化する事例も多くあるようです。

中国のレアアース製錬工場と磁石製造工場を訪問

採掘したレアアース鉱石は、①湿式製錬（溶媒抽出）か、②乾式製錬（溶融塩電解）により製錬します。

①の湿式製錬（溶媒抽出）は、水溶液に溶かした金属を分離・濃縮して純度を上げる方法で、重金属や酸を含む有機物の廃液が大量に発生します。

②の乾式製錬（溶融塩電解）は、約千度の電気炉で希土類酸化物の原料をフッ化物溶融塩の中に投入して

融解させて電気分解する方法です。高温のフッ化物溶融塩は、大気中の水蒸気と反応すると、HF（フッ化水素）ガスが発生します。

①も②も、技術的には日本をはじめ世界各地で行えますが、フッ化物を含む排ガスの処理や廃液の処理などの環境コストが莫大であることから、環境規制の厳しい先進国では実施すると高いコストがかかります。その結果、①と②の製錬工場は中国に一極集中しています。

先程ゴミゼロ化の話をしました。日本の工場にそれが可能なのは、「天然の鉱石を輸入して国内で製錬する」ということをせず、有害廃棄物の処理など、環境負荷が大きい部分は全て国外の事業者任せ、製錬後の高純度の合金を輸入しているからです。

ただ、実際に中国の製錬工場を訪問して驚いたことです。近年は想像以上にしっかりと排ガス施設を設置していました。二〇一〇年に起きたレアアース・ショック（中国がレアアース輸出の大幅削減を発表）で価格が十倍以上に高騰して儲かったので、環境に配慮できるようになったのでしょう。

もう一つ気付いたのは、一部のレアアースの製造技術は、すでに世界のトップレベルの水準に達しているということです。一例を挙げると、サマリウム（レア

アース）の還元・分離技術などは中国の方が日本より進んでいます。

中国の環境規制は、日本に較べ緩いため、中国での廃棄物処理や排ガス処理のコストは日本の十分の一分で済みます。これが日中の環境コストの差となり、中国では価格競争力のあるレアアース素材を生産できるのです。

レアメタルのリサイクルを目指して

私は二十年以上も前からレアメタルのリサイクル技術の開発に力を注いでいます。この研究は省エネや環境保護の観点からだけでなく、レアメタルの供給バツファ（予備・余裕）を保つという観点からも重要です。しかし、私の取り組みは、以前はその意義すら全く理解されませんでした。時代と環境が変わり、今は皆さんから私の取り組みに対してお褒めの言葉を頂きます。私の目標は、廃車や電子機器などのスクラップから環境負荷を与えずにレアメタルを効率良く濃縮・分離する新技术を確立することです。これが私の使命であり、材料プロセス工学（精錬工学）の基本と思っ

て取り組んでいます。一般的には人気のない分野です。

大雑把に言うと、ガソリン車一台には、金〇・二

〇・五g（電子基板）、銀二・五g（電子基板）、銅二十・三十kg（HV…五十kg、EV…六十kg）、白金〇・五・二・五g（排ガス処理触媒）、パラジウム一・四・五g、ロジウム〇・二・〇・六gが使われています。白金族金属（白金、パラジウム、ロジウムなど）は微量でも大変高額なので、金、銀、銅とともにリサイクルされています。しかし、レアアースをはじめとして、多くのレアメタルは経済的に採算がとれないため、リサイクルが進んでいません。というのは、鉱石から抽出する方が、リサイクルするよりもコストが安いからです。たとえば、鉱石から得たレアアースの価値は、廃棄物処理を中国で行なっているため、環境破壊のコストをほぼ負担せずに済み、採掘・製錬・加工・物流などのコストのみから決まるため、非常に安価です。同じレアアースをリサイクルで得ようとする、日本ではスクラップの回収コストや処理コストが高く、それらがコストとして加わるので、リサイクルコストがもっと高くなります。

しかし、鉱物資源の本質的な価値（Value of Nature）を考慮すると、処理コストの負担が増えるとしても、リサイクルは必須です。莫大な環境修復コストを考慮すれば、鉱石から抽出したレアメタルよりも、リサイクルのコストの方が安価になります（図7）。

Value of nature について

(a) 現在の経済原理によるレアメタルの（見かけ上の）価値

(b) Value of Nature を考慮したレアメタルの価値

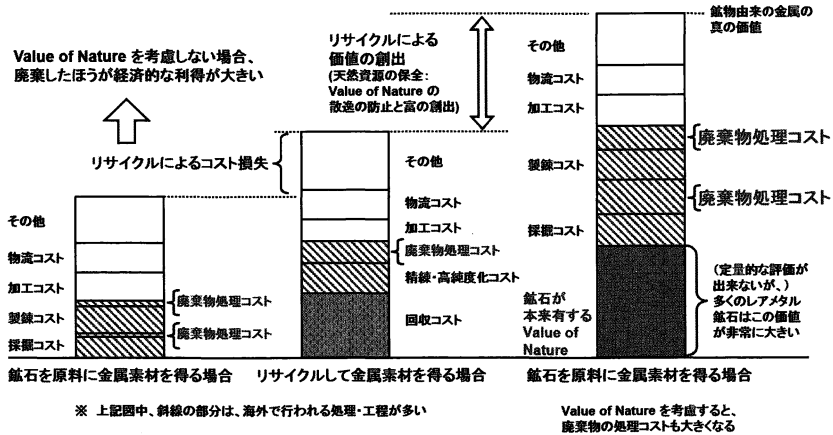


図7 金属素材の価値の考え方（現在の社会システムでは Value of Nature について考慮されていない）

また、「環境性能がよい」「省エネだ」という謳い文句に踊らされて次々とハイテク製品を買い替えて、「環境に貢献した」とは絶対に思わないことです。使わなくなった携帯電話などは、回収センターに持って行って下さい。携帯電話一台に含まれる金の量は微量です。それでも金の品位は金鉱石の百倍はあるので、まとまった量が集まれば、業者は必ず回収します。さらなる供給障害のリスクを回避するためにも、中国とロシアが牛耳るレアメタルを中心に、我が国はリサイクルと備蓄の推進が必須と考えています。

最後に、日本にできること。最後にお話したいのは、レアメタルのほぼ全量を輸入する日本は何をすべきかです。最良なのは何も買わないことですが、もしも買うなら、とことん使用して下さい。わざわざ省エネ製品に買い替えた末に、それを使わないとすれば、資源環境的には大きな罪です。

日本の社会システムの最大の問題は、経済原理が優先され、鉱物資源が本質的に有する価値が評価されず、タダ同然で採掘され、消費・廃棄されていることです。私たちはリサイクルと環境保護について、もっと真剣に考えるべきです（引用文献1、3）。

引用文献

(1) 岡部 徹：『レアアースをはじめとするレアメタルの資源戦略と環境制約』、『環境情報科学』vol.43, no.4, (2015), pp.1-6.
(2) 岡部 徹：『レアメタルに関する大きな誤解：工場のゴミゼロ化は本当に環境に優しいのか?』、『OHM (株式会社オーム社)』vol.104, no.11 (2017) pp.40-42.

(3) 岡部 徹：『私見卓見：金属資源開発、環境コスト忘れるな』、『平成三十年(二〇一八)八月六日(月) 日本経済新聞、十三面』(2018) pp.13.

(☆) 図3 (巻頭カラー) 引用文献

https://art.rmn.gp.fr/fr/library/artworks/piece-de-surtout-en-aluminium-group-de-5-amours_dore_bronze_cuire-metal_argente_aluminium_dore_1858

(東京大学生産技術研究所教授、持続型エネルギー・材料統合研究センター長、京大・工博・工・昭63)

(本稿は平成30年10月10日夕食会における講演の要旨です)

レアメタル — 資源の現況と今後の活用法 —

本文 53 頁～67 頁参照

おか べ とおる
岡部 徹



図3 ナポレオン三世のために、1858 年につくられたアルミニウム製の彫像 (JOM (Journal of Metals), November 2000, の表紙から引用, the Carnegie Museum of Art, Pittsburgh, Pennsylvania. 原典は引用文献 (☆))



『カナメ チタン段付本瓦葺き』

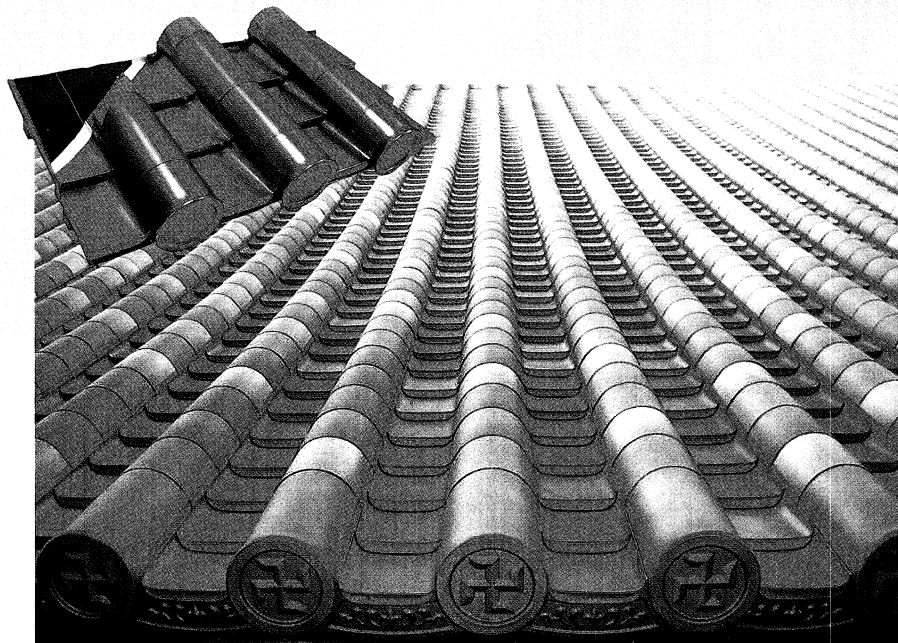


図4 チタン製の瓦で葺かれた浅草寺 (写真提供は (株)カナメ)