

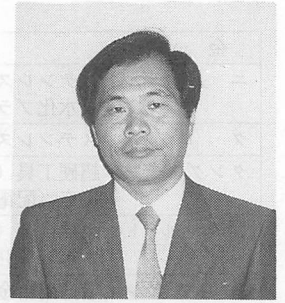
■ 論 説 ■

金属系資源循環と社会的背景

Recycling of Metal Resources and Social Background

中 村 治*

Osamu Nakamura



1. はじめに

1989年は東ヨーロッパにおいて社会主義経済から自由市場経済への移行が行われた年であった。これは単に経済原理の変換だけではなく、民族主義が中央集権体制に打ち勝った結果だとも言える。そしてそれは昨年末にその総仕上げともいわれるソビエト連邦の崩壊にもつながった。この改革は200年前のフランス革命を代表とする絶対王制から民主主義への移行に匹敵する事象といえる。両者間には類似点が多いが、逆に決定的な違いも多く、その一つとして情報の伝播の速さがあげられる。個々人の置かれている社会情勢がどのようなものであるか、今が行動を起こす最良の時期であるか等の判断がごく短時間のうちになされた結果と言えよう。同じ情報が欧米諸国及びわが国にも迅速に広がり、今や地球全体が一つの情報社会の下に存在していると言っても過言でない。

2. 経済社会構造の変遷

このように、わが国の経済社会構造は世界のそれと切り離しては考えられない状況にはあるが、それに加えわが国独得の問題もかかえている。21世紀をにらんだ1990年代の経済社会構造の変化要因を考えてみると、大きく次の4テーマが浮かび上がってくる^{1,2)}。①今後さらに続く技術革新の進展による生活空間の広がり。航空、宇宙、深海等人類が到達しえなかった領域の現実化、あるいは人工的に作り出された特殊環境の創製。これらの実現には多大な人類の英知とエネルギーが必要である。②人間の長寿化、女性の社会進出、休暇の増加等の生活様式の変化。人々はゆとりと豊かさ、生活の快適さを求めるため技術分野へのニーズが生まれ、その結果ハイテクを駆使した機器、人間の代わりをし

てくれるロボット等の開発が加速される。われわれの生活の質の向上のためにはますます多くの物質(資源)、エネルギーが投入されねばならない。③多極分散型国土の形成及び都市機能高度化の必要性の高まり。そのためには高速性、信頼性及び安全性が要求される物流システムが構築されねばならない。また金融、情報等経済活動の基盤となる機能都市への集中及びそれに対応したセキュリティの確保も求められている。④NIESの台頭、企業活動のグローバル化の進展、国際特許摩擦の顕在化等の国際環境の変化。わが国の経済力、技術水準の向上等による国際的責務の増大とともに地球的規模の環境問題が最近とみにクローズアップされてきている。これらの国際問題を解決するための方策の一つとして、資源リサイクルの高度化等の技術開発により、積極的に国際化に向けて対応していかなければならない。

経済社会の構造的変化は常に技術革新とともにあるとも言える。すなわち、技術の革新は経済社会構造を変革し、経済社会構造の変革は次の技術革新を求める。現在、情報処理、原子・分子レベルからの材料開発等のキーワードのもと、科学と技術の間には境界はなくなりつつある。このような状況の下、ニーズに応えて多様な産業が生まれてきているが、それらを根本から支えているのは、材料及びそれを創り出す技術である。本稿ではその材料のうち、われわれの生活に深く関わっている金属材料に焦点をあて、その資源及び使用について社会構造との関連において考える。

3. わが国産業における金属資源の需要

近年の電子機器産業、原子力産業、航空・宇宙産業等の先端技術産業の発展には目をみはるものがあるが、これらを支えるものとして高機能材料の開発及び応用技術の高度化の進展があつて初めて可能になったものである。とりわけ、電氣的、磁氣的特性に対し特異的機能を有する金属及びその化合物を見逃すわけにはい

*大阪工業技術試験所 無機機能材料部粉体材料研究室長
〒563 池田市緑丘1-8-31

表1 代表的レアメタルの主要用途

金 属	主 要 用 途
ニッケル	ステンレス鋼、構造用合金鋼(自動車、船舶、産業機械等)、メッキ、非鉄合金(電子機器、海水淡水化プラント等)、磁性材料(スピーカー、モーター等)、IC材料、蓄電池(ニカド電池)、触媒
クロム	ステンレス鋼、構造用合金鋼、メッキ、スーパーアロイ(原子炉材、航空機部品等)
タングステン	超硬工具(ドリル、カッター等)、高速度鋼、耐熱鋼、線棒板(フィラメント、カソード等)、接点(配電器、警報器等)、触媒(石油精製、公害防止用)
コバルト	耐熱合金(ガスタービン、ジェットエンジン等)、高速度鋼、磁性材料(永久磁石、VTRテープ等)、超硬工具、触媒(重油脱硫、石油化学用)
モリブデン	構造用合金鋼(シームレスパイプ用等)、ステンレス鋼、高速度鋼、綿棒板(電子材料等)、触媒、潤滑剤
マンガン	普通鋼(脱酸・脱硫用)、高マンガン鋼、非鉄合金(アルミ缶等)、乾電池(活物質、減極剤)
バナジウム	高張力鋼(パイプライン)、工具用鋼、触媒、超伝導材料

表2 世界のレアメタル消費量に占める日本の比重

金 属	消費量	第1位消費国	第2位消費国	第3位消費国
ニ オ ブ	5,744 t	日 本 (32.6%)	アメリカ (23.8%)	西ドイツ (23.3%)
ガ リ ウ ム	40.0 t	日 本 (66.3%)	アメリカ (25.0%)	ヨーロッパ (8.7%)
ストロンチウム	94,300 t	日 本 (58.3%)	アメリカ (37.1%)	西 欧 (4.6%)
ジルコニウム	665 t	日 本 (25.4%)	アメリカ (12.6%)	イタリヤ (9.3%)
セ レ ン	1,225 t	アメリカ (32.5%)	日 本 (17.1%)	イギリス (8.2%)
タ ン タ ル	1,133 t	アメリカ (75.0%)	西 欧 (13.6%)	日 本 (11.4%)

かない。表1にはその一例として代表的レアメタルがどのようなところに使われているかを示す³⁾。これを見ると、いわゆる機能材料としてだけ使われているのではなく、基盤産業における鉄とともに使われ、性能向上に役立っていることも読み取れる。構造材に使用される場合、使用分率は少なくとも材料そのものが大量に生産されるため、これらレアメタルの消費量もまた多大なものとなる。銅は電線・ケーブル等に使われていることはよく知られているが、わが国の代表的な産業である自動車産業についてもかなり使用されており、たとえば自動車1台あたり12kgも必要としている。亜鉛についても、鉄のさびを防ぐ手段として、近年ペイントから亜鉛メッキへと変遷していく傾向がみられ、大幅な需要増につながる恐れがある。

これを世界的規模でみると、わが国の銅及び亜鉛の消費量はそれぞれ世界の12.5%及び10.9% (1988年)である³⁾。レアメタルに関しては世界の消費量の20%以上を消費する大消費国である⁴⁾。特に表2に示すようにニオブ、ガリウム、ストロンチウム、ジルコニウムに関しては世界第一位消費国となっている。したがって、レアメタルの有効利用は国際社会におけるわが国の責務である。電子、機械工業の諸分野におけるレアメタルの利用形態、消費等の実態把握並びにメーカー・ユーザー間のマテリアルフローについては文献4に詳し

くまとめられている。

金属材料の使用量は総じて国民一人当たりのGNPと深く関わっている。すなわち、経済水準の向上に伴って金属消費量が増加することが統計上明かである。したがって、前節で述べたように今後産業構造、経済社会構造が変化すればそれにつれて世界的にみてもますますその需要量が増大することが見込まれる。

4. 金属資源をめぐる環境変化

第2節で述べたように、わが国の産業、生活様式をとりまく環境はどんどん変化してきており、資源問題にも大きな影響をもたらすと考えられる。非鉄金属は需要、供給とも価格に対して弾力性が極めて乏しいのが特徴である。わずかな需給ギャップや在庫の変動に対して価格は敏感に反応する。また、わが国は自給率が低く、一次供給源の相当部分をストライキ、政情不安定等、供給面に問題のある国々に依存している。価格変動の社会的要因としてカントリーリスクという概念があり、それは「海外投融資や貿易の相手国の政策変更、政治社会経済環境の変化により債務の返済、投資の回収が不能になるような危険」と定義される。現在の中南米、アフリカにはこの評価点が低い国が多い³⁾。それに加え、資源は本来的に特定の場所に存在し(資源の偏在)、また鉱床を発見し得るかどうかは、

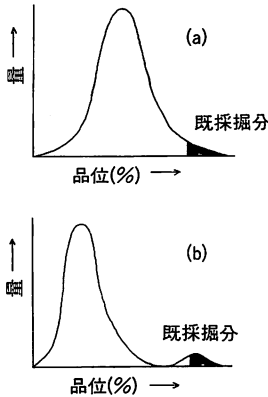


図-1 地球科学的に (a) 豊富な金属 (Fe, Al, Si, Ca等) 及び (b) 乏しい金属 (Cu, Pb, Zn, Au等) の地殻における分布曲線

多くの地質学的知見が蓄積された今日においてもなお不確定性が伴う。これまでは幸いにして必要な量の資源が発見されてきたが、今後もそうである保証はない。Skinnerらは³⁾、銅、亜鉛等地球科学的に乏しい金属の有望鉱床の多くがすでに発見されてしまっているとさえ報告している(図-1)。今後、探査の対象が地下深部に移行していくなど新たな鉱床を発見するのはますます困難になっていくものと思われる。資源開発はリスクが高いだけでなく、周辺のインフラ整備等も含めて投資額が大きく、かつ固定費用の部分が大きい。したがって、一時的に価格が下落したからといっても容易に閉山できない状況にある。

鉱石の埋蔵量に関しては、1988年ベースで経済的に採掘可能な確認埋蔵量(R)は銅で3.5億トン、亜鉛で1.5億トンとなっており、これに対する生産量(P)の比、可採年数(R/P)で表示するとそれぞれ40年分、20年分となっている³⁾。主なレアメタルのR/P値を表3に示すが、いずれも数十年程度と見積もられている。もう少し範囲を広げて準経済的埋蔵量も含めても約2倍にしかならない。先進国及び発展途上国等における生活レベル向上に伴う消費量の増加によって今

表3 主なレアメタルの可採年数(R/P値)(1988年)

	可採埋蔵量(R)	生産量(P)	R/P値(年)
バナジウム(千lb)	^a 9,410,000	67,000	140.4
クロム(千t)	1,030,000	11,290	91.2
コバルト(st)	^b 3,650,000	50,680	72.0
タングステン(t)	2,656,000	41,130	64.6
モリブデン(千lb)	12,200,000	189,000	64.6
ニッケル(st)	54,000,000	876,500	61.6
マンガン(千st)	1,000,000	25,600	39.1

注：a：アメリカは未公表，b：アルバニアは未公表

後は分母のPが増大していくため、Rを増やす努力を怠ると今後R/P値は急速に低下していくことが明かである。ちなみに、石油の例をみるとR/P値は43.6年(1987年)となっており、非鉄金属と同程度であることを考えると、金属資源についてももっと真剣に議論がなされてもよいように思われる。

5. 資源確保施策

わが国経済が自由経済である限り、金属資源の量及び価格確保のためには原則的に市場メカニズムに基づいた政策が必要である。短期的には、需要、供給とも価格に対して非弾力的であるため、投機的な要因も加わって価格は著しく高騰したり暴落したりする傾向がある。このような場合、一時的な緊急支援施策をとることもあるが、政府自らが直接的な介入を行うことは好ましくない。長期的には、適正水準の探鉱、開発を維持するために必要なインセンティブを与えて資源制約を緩和していくことが必要である。また、わが国は金属の大消費国として経済力に応じた国際的責務を果たしていく必要があり、自国だけでなく世界の市場動向に配慮した施策が望まれる。金属鉱物の輸出に大きく依存している発展途上国は、経済発展のためには資源輸出による収入が安定にあることが必要であるので、国際貢献という観点から探鉱協力、技術者の育成等を通じて支援していくことが重要である。

備蓄、探鉱、技術の高度化(リモートセンシング技術、鉱床の深部化対応技術等)、発展途上国に対する環境問題への対応をも含めた技術移転、情報収集及び分析も重要な課題ではあるが、流通に関する問題も一考を要する。わが国は長年にわたり、大量の消費が続く、金属の蓄積量が大きくなっている。これを貴重な国内資源として、その活用を図っていくことが大切である。廃棄物の再資源化(リサイクル)も資源確保のための有効な手段である。再資源化を促進するためには、まず素材そのものを再資源化に適合させることが必要であり、次に製品設計の段階で再資源化を念頭に置くこと、さらには、回収されたスクラップを金属に再生する際、不純物等の分離に関し採算の合う技術を開発することが有効である。

近年のわが国経済の着実な発展に伴い、廃棄物の排出量が増大し既存の焼却施設、最終処分場の処理能力は限界に達している。また、そのための費用は今後も増大することは確実である。このような状況に対応するためには有限である資源を有効に利用し、廃棄物を

極力減量化し、再資源化に努めていくことが問題解決の本質となるので、そのような社会を構築し、資源の有効利用を図ることが望まれている。一方で、生活のゆとりと豊かさは今後も以前にまして追求されることが予想され、それに伴う電気エネルギーの需要は急激なテンポで拡大の方向にある。エネルギー需要の拡大は、有限かつ希少な資源の消費のみならずCO₂、NO_x、SO_x等の環境負荷物質の発生を助長する可能性が高く、地球環境の破壊に通じる。このための対策として、石油から天然ガスへの燃料転換、生産設備の合理化及び高度化が求められ、ここにまた従来とは質の異なった金属資源の需要が見込まれることになる。エネルギーに関する技術としては、高効率の発電技術、廃熱回収技術の開発によるエネルギー変換効率の向上、新エネルギーの開発が主なものである。

従来の技術開発及び製品開発は、性能向上、コストダウンといった市場原理に従ってなされてきた感があるが、今後においては環境負荷低減といった評価軸の導入がせまられている。

6. 機能付与による省資源

材料開発からみた対策としてまず第1に、建築物、自動車、家電等製品の長寿命化が考えられる。単純に考えて、寿命が2倍になれば、製品を作り上げるために必要なエネルギー、材料は一定であるのでそれだけ省エネ、省資源になる。しかし、われわれの製品に対する要求は単に機能だけでなく、自動車等で代表されるように色や形まで変化させる。人間の感性を満足させるにはそれに見合うリフォーム技術の向上が求められる。たとえば部品のブロック化、プラグイン化、さらには粘土細工のような塑性変形技術等である。

鉄について言えば、人類は酸化を防ぐためにいろいろな混ぜものを試みてきた。そしてついにはステンレス鋼を完成させたわけであるが、一方で鉄を高純度化した場合さびなくなるという実験事実もつきとめている^{6,7)}。現段階においてはステンレス鋼の製造がコストも低くまたその使用についても慣れ、ノウハウが蓄積されているので使用されているにすぎない。高純度化技術が進展し、コストダウンにつながれば、クロム、ニッケル等レアメタルの使用量が激減するであろう。鉄のさびを防ぐ他の方法として、亜鉛メッキによる表面処理がある。亜鉛は鉄よりイオン化傾向が大きいので亜鉛のほうが先に酸化され酸化物になる。アルミニウム/アルミナ系におけるアルマイト処理の場合のよ

うに、この酸化皮膜を硬くし、かつ表面に固定する技術の開発が待たれる。亜鉛メッキのさらなる特徴はメッキ層を越えた深い傷が鉄層にまで達した場合でも亜鉛は犠牲防食作用を有するのでその傷をふさいでしまう性質を持つことである。このように、自己修復能をもった材料を開発することも材料の長寿命化につながる。自己修復機能の付与方法はこのほか種々考えられている。

第2の方策として、機能付与は本当に特定のレアメタルの使用なしでは果たせないのかどうかをもう一度検討してみる必要がある⁷⁾。材料機能は粒界、界面、表面に起因する場合が多い。その場合、バルク内にまで貴重なレアメタルが存在する必要があるかどうか再検討をしてみるのも悪くない。粒界や界面には不純物の偏析が多いし、また、原子の誤配列、配列の乱れ、格子欠陥の存在等複雑な現象が存在し、それがまた機能発現の源となっていることもめずらしくない。このメカニズムの解明、制御法の確立等技術の関与する部分が多く残されている分野である。機能付与方法に関しては、構成粒子の微粉化、粒子の形状制御、薄膜化等種々あるが、これらの活用法、技術の複合化においてもまだまだ十分に検討されているとはいえない。

第3は、効率のよい資源の回収、リサイクル技術の開発である。現在は天然の鉱石からの製錬がコストが低いので、資源循環は思うようには進んでいない。しかし、第4節で検討したように、金属資源は石油と同様限りあるものであるので、上記で述べた材料開発、製品製造システム及びコストダウンのための技術開発も含めた高度リサイクルシステムの確立が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 通商産業省基礎産業局非鉄金属課監修；金属素材の将来展望（1991）、通産資料調査会。
- 2) 通商産業省基礎産業局非鉄金属課監修；ミネルパ21（1989）、通産資料調査会。
- 3) 通商産業省資源エネルギー庁；2000年の資源ビジョン（1990）、通商産業調査会。
- 4) レアメタル31（1990）、新金属協会。平成2年度レアメタルの高度リサイクル利用促進に関する調査研究報告書（1991）、新金属協会。
- 5) B. J. Skinner；Amer. Scientist, Vol 64（1976）、258～269。
- 6) 杉本克久ら；日本金属学会誌、Vol 46、（1984）、155。
- 7) 大阪工業技術試験所；超高純度分離加工技術に関する調査研究報告書（1991）。