Resources Recycling and Environmental Issues

by Iwao IWASAKI¹

1. Dr., Technical Councilor, Central Research Institute, Mitsubishi Materials Corporation, Omiya 330

Resources supply and environmental protection are increasingly becoming matters of global concern. With increased industrial activities worldwide, a possibility for exhaustion of mineral resources as projected from past demands stirred much controversy regarding the future supply of metals. Mass production and mass consumption generate massive quantities of industrial scrap as well as post consumer wastes. Mounting public sentiment against construction of new landfill sites necessitates volume reduction of wastes to be disposed. Incineration is an effective way to conserve landfill spaces, but the potential generation of dioxins and underground water contamination by incinerator residues are becoming a growing public concern. Establishment of social systems for waste minimization and promotion of re-use as well as of technology for improving recycling efficiencies are needed for sustainable development. In this article, concerns over mineral resources supply, issues in environmental protection, and the problems and technological developments associated with recycling are summarized.

KEY WORDS: Resources, Environment, Waste, Landfill, Recycling, Separation Technology

1. はじめに

リサイクルは資源問題、地球環境問題で大きくクローズアップされている。近年の大量生産、大量消費、大量廃棄は資源やエネルギー、自然環境の有限性への認識を喚起し、埋立地の逼迫、焼却炉排ガスによる環境汚染、焼却灰の最終処分対策は廃棄物の再利用や再生処理への関心を高めている。国内資源に乏しい我が国の原料輸入、国内生産、製品輸出の物質収支をみると、国内に蓄積される耐久財の量は年間1~2億tにものぼると推定され、将来の貴重な国内資源となっていることを意味している。この潜在資源を有効に活用して行くには、やがて廃棄される製品も含めて廃棄物の回収率、再資源化率の向上が必要になる。それには一般消費者の意識改革とともに斬新なりサイクル技術の振興が鍵となる。

廃棄物問題、殊に産廃施設の建設に対する住民意識の高揚は産業活動のボトルネックとなってきたおり、このますます深刻化する問題の解決には政治、社会、技術の3方向から早急な対策が必要となっている。技術面では廃棄物をできるだけ出さずに、できるだけ再利用可能な製品をつくる技術と同時に、それでも発生する廃棄物を効率的にまた環境負荷を最少とするリサイクル技術の開発が望ましい。資源リサイクル部門委員会では、1995年に物理選別技術の基礎について、1996年には化学処理技術の基礎についてのセミナーを多数の参加者を得て開催し、リサイク

リング技術の体系づくりへ向けて踏み出したところである。ここに大特集号としてセミナーの内容も含めて出版される運びとなったことは、時宜を得た企画であり、応用例、事例とともに技術の体系構築へ向けて貴重な資料を提供している。

ここでは、資源リサイクルの基本となるコンセプトとして資源確保への懸念、環境保全への対策、リサイクルの問題点および技術開発を取り挙げて要約した。

2. 資源確保への懸念

1972年に刊行された「成長の限界」(Meadowsら、1972)では差し迫った天然資源の枯渇について警告し各方面に大きな反響を与え、省資源への関心を高めるきっかけとなった。しかしその後この分析には埋蔵量と資源量が同義に使われていることが指摘されている。埋蔵量とは現在の技術で経済的に採取可能な鉱量、資源量とは現在経済的に採取できない鉱量ならびに未発見の鉱量も含めての推定量を指している。それゆえ埋蔵量は技術の進歩と経済状態により変化する。そのよい例が近年脚光を浴びているヒープリーチング・SX-EW法の開発によって埋蔵量へ移行した酸化銅鉱石であろう。資源量は未発見の鉱量をいかに推定するかによって大幅に変化する。地球の大半は未調査であって現在報告されている資源量は信頼度が低いとされ、深海底鉱物さらには海水に溶存するイオンも当然将来の資源に含められる。

「成長の限界」の発刊から四半世紀を過ぎた現在、世界の急速な資源消費量の伸びにもかかわらず、危機的な徴候はみられていない。これは1つには1970年代の2回にわたるオイルショックで経済成長に歯止めがかかり、また産業構造の大幅な変化により軽薄短小傾向とプラスチック、セラミックス、複合材料、光ファ

* 1997年8月13日受付 9月29日受理
1. 正会員 工博 三菱マテリアル(株)総合研究所技術顧問
〔著者連絡先〕FAX 048-644-8608 (三菱マテリアル・総合研)
キーワード: 資源, 環境, 廃棄物, 埋立, リサイクル, 分離工学

表1 1940年代から1980年代への世界の埋蔵量の推移
(含有金属量単位100万t, 10年代の最終年の埋蔵量を示す)
(NRC, 1996)

	1940年代	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代
アルミニウム	1,605	3,224	11,600	22,700	23,200
銅	91	124	280	543	566
鉛	31 ~ 45	45 ~ 54	86	157	120
亜鉛	54 ~ 70	77 ~ 86	106	240	295

イバーなどの代替材料の普及により金属の需要の伸びが指数関数的な増加から大幅に低下したことによる。それにも増して、企業の探鉱や選鉱技術の開発努力によって埋蔵量が着実に増加したことである。表1に世界におけるアルミ、銅、鉛、亜鉛埋蔵量の過去50年間にわたる推移を示しているが、鉱量の枯渇により廃山となって減少した埋蔵量を上回る鉱量が新鉱床の発見や技術の進歩によって追加されてきたことがわかる(NRC, 1996)。その結果、埋蔵量を年間消費量で割った可採年数をみると現在も30~50年に保たれている(秋山, 1993)。このことは企業の経営にそれ以上の埋蔵量を確保する必要がないため投資が行われないことによるもので、資源の枯渇を意味するものではない。しかしこれまでに発見された大規模鉱床のように地表に何らかの徴候が現れているものは少なくなっており、新鉱床の発見には探査が地下深部に移行せねばなくなっている。そこで今後は表土さらには溶岩におおわれている地表に徴候のみられない地域でのより高度な探査技術の開発が必要になるであろうし、またさらに鉱床の成因論の進歩により、全く新しいタイプの鉱床が見つかる可能性もあり、現にいくつかの重要な発見例がみられている。

しかし究極的には地殻中の資源が枯渇するであろうことは当然予想されるところであり、地表付近における元素の平均存在値、すなわちクラーク数から推測される資源量はその一例であるが、資源の限界について考察を進めるにはその分布についての推定方法が必要になる。Skinner (1976) は、地殻中に存在する元素の分布は図1に示すようにピークが1つまたは2つある曲線で表せることを提唱した。Fe, Ti, Alのように地殻中に多量に存在する金属の分布は図1(a)に示す1つのピークを持つ曲線で表され、

図1 地殻中の金属の分布 (Skinner, 1976)

現在までに稼行された鉱床は高品位側から始まって、今後品位を下げると鉱量は幾何学的にふえるという通念があてはまることになる。

地殻中に比較的稀少な金属、例えばCu, Pb, Zn などについては図1(b)に示す2つのピークを持つ曲線で表され、鉱床として硫化鉱物、酸化鉱物など鉱石の形で存在する元素は小さなピークを持つ曲線、岩石中に置換原子として存在する元素は大きなピークを持つ曲線として表される。そこで地殻中に豊富な金属でも稀少な金属でもいずれも選鉱には採取する金属の単位重量当たりに必要なエネルギーは品位が下がるに従って増加する。また後者の場合には2つのピークの谷間の品位に到達すれば、珪酸塩中に置換する金属を採取せねばならないことになり、所要エネルギーは飛躍的に増加することになる。

金属資源は一般に枯渇性資源とみなされているが、化石燃料とは異なり再生利用が可能であり、将来の資源確保には一方で今後低品位化、深度化、難処理化して行く天然鉱石の製錬に対して用途の多様化に伴う複合材料や除去困難な不純物を含む金属資源の再生処理との経済性の比較が鍵となる。いずれの処理についてもますます多量のエネルギーが必要になり、真に枯渇性資源である化石燃料の可採年数の方が懸念事項となろう。廃棄物の熱量を含めて広範囲のエネルギー資源の利用開発が望まれることになる。

近未来の懸念事項としては、我が国のように非鉄金属消費量が世界の約10%を占め、アメリカに次ぐ世界第二の消費国であるにもかかわらず、鉱石供給の大部分を海外に依存し、また世界の鉱石貿易の半分近くを占めていることの方が大きな問題となる可能性がある。今後発展途上国を中心として人口増加と生活レベル向上の相乗効果による消費量の急増が予想されている。世界の国々の人口1人当たりの銅消費量をドルベースのGNPに対してプロットすると、GNPの増加に伴って10kg付近に収れんする。インドの場合、人口が1976年から1990年までの15年間に6億2,000万人から8億5,000万人へと2億人以上も増加しているにもかかわらず、GNPは150ドルから350ドルと2倍以上へ、銅消費量は80gから160gへと倍増している(秋山, 1993)。中国の消費量については表2に見られるように1985年から1995年の10年間に人口1人当たり390gから750gと倍増しており、年間成長率を7.8%と仮定した場合、2010年までにさらに倍増することが予想されている(Williamson, 1997)。この表ではインドの今後の年間成長率は0.8%にしか見込まれていないが、最近の経済開放で今後経済成長が期待され、生活レベルの向上と人口の増加からさらに大きな銅需要の成長率も可能と考えられる。

そこでインドと中国の消費量が10kgに達するにはほど遠いにしても、近い将来に倍増することは容易に想像される。その場合、これら2カ国の人口から予想される増加量は年間100万ないし150万tにも達することになり、近い将来世界市場における銅精鉱確保への競走の激化することが予想される。それゆえ鉱物資源

表2 国別1人当たりの銅消費量と全消費量の推移 (Williamson, 1997)

	アメリカ		日本		中国		インド	
	kg/人	千t	kg/人	千t	kg/人	千t	kg/人	千t
1985	8.2	1,958	10.2	1,226	0.39	420	0.11	82.5
1990	8.6	2,150	12.8	1,577	0.44	512	0.16	135
1995	10.3	2,716	11.4	1,415	0.75	911	0.12	114
2000					0.93*	1,207*	0.12*	134*
2010					1.28*	1,784*	0.13*	161*
2025					1.81*	2,738*	0.15*	209*

*中国の増加率7.8%/年, インド0.8%/年を仮定

の長期安定供給を確保できなければ価格高騰を招き我が国の産業の国際競争力の低下を招くことは明らかであろう。しかし現在我が国の海外非鉄鉱山の自山鉱比率は50%を大きく下回っており、安定供給を保って行くにはこの比率を高めて行く必要があると思われる。海外の非鉄メジャーの場合、自山鉱比率は80%程度となっており、鉱山と製錬の一貫経営で収益のバランスをとっているといわれる。

3. 環境保全への対策

経済の高度成長に伴い大量の資源を消費して大量の製品を生産し、紙やプラスチック、缶や瓶などの金属類やガラス類、家電製品やOA機器の普及で粗大ゴミ、年間500万台にもものぼる廃車の再生処理で発生するシュレッダーダストなどが大量に廃棄されるようになった。その処分方法によっては地球環境に大きな負荷を与え、酸性雨、オゾン層の破壊、温暖化などに並ぶ地球規模の環境問題としてとらえるべき国際的な基本問題となってきた。

廃棄物はそのまま埋立てても大気汚染、土壌汚染、地下水汚染のリスクは存在する。それゆえ適切な処理によっていかにして衛生環境、生活環境、自然環境へのリスクを最小限に抑えて処分するかが課題となってくる。殊に国土の狭い我が国では減容化、無害化に焼却処理が最も効率的であるとの観点から広く行われているが、排ガスやダスト、焼却処理によるダイオキシンの発生や焼却灰埋立による地下水汚染が懸念されるようになって、いろいろ技術的な対応が迫られている。

大都会で発生する大量の廃棄物の最終処分には新規埋立地の建設に周辺の住民の合意を得ることが難しくなってきた最終処分場の残余容量の逼迫が深刻な問題となっている。その打開には定量的なリスクアセスメントを公開し、施設周辺の住民への説明会を通して、環境影響評価への合意を求め、施設建設への協力を得ることの重要性が認識される。

このようにますます厳しくなってくる状況下、ゴミの発生自体を最大限に抑制し、それでも発生する廃棄物は最大限に再利用、再生利用を促進し、そのあとに残るものは焼却により減容化し、焼却灰や残渣中の有用物を回収資源化し、埋立するしかないもののみを環境に問題を残さないよう最終処分するという社会的システムを構築することが必要となる。ここで再利用と再生促進の必要性を指摘したが、環境負荷の低い再利用(re-use)をまず検討することが望まれる。ある産業の廃棄物が他の産業の原料となり得ることから、アメリカでは廃棄物交換制度の全国ネットワークを設立して目録を作成し、情報交換を助成して減容化への努力が試みられている。この点に関連してドイツと日本におけるゴミの再利用割合を比較した例をみると日本では10%にとどまっているのに対して、ドイツでは1人当たりのゴミ排出量が日本の約80%、再利用率も72%と大幅に高くなっており(廃棄物学会, 1995)、リサイクル促進への社会制度、住民意識の役割が示唆されている。とりわけ、ドイツにおいて環境保護は将来世代に対する国の責務とし、厳しい環境基準を達成してこそ国際競争に生き残れるという長期的な国家戦略(大橋, 1997)としていることは注目に値する。

バーゼル条約は元来先進諸国が有害廃棄物を発展途上国へ搬入し安易に遺棄処分することを禁止する目的で国連主導で制定された(Alter, 1997)。しかしこの条約は有害廃棄物の越境移動、不法投棄の抑制を目的としたけれども、リサイクル目的の二次原料の世界貿易も規制の対象となってしまう短所も出ている。世界には二次原料を自国内で消費できる以上に発生している国もあれば、国内資源に乏しいため、あるいは経済上または環境上の理由で鉱

図2 品位の異なる鉱石から銅生産に要するエネルギー量 (Govett and Govett, 1978)

山や製錬所を所有していない国もあり、大量の二次原料が広く取引されグローバルに環境への負荷を軽減してきた。すなわちある国では廃棄物であっても、他の国では大切な資源となっているということである。例えば含銅廃棄物はいわゆるグリーン(nonhazardous)リストからアンバー(mildly hazardous)リストへ、究極的にはレッド(hazardous)リストへ移される可能性が高くなってきた。この種の低コストの廃棄物の取引が有害廃棄物と混同されて大幅に制限された場合、殊に発展途上国における重要な雇用産業をゆるがすことにもなり、この点国際貿易と環境対策の協調が望まれることになる。

一方、資源のほぼ全量を海外に依存している我が国においては、輸入資源を最大限にリサイクルして再利用することは国内における環境問題のみならず、グローバルにも重要な課題となっていることを認識する必要がある。その一例を銅製錬にとってみると、電気銅1tの製錬に3tのスラグ、3tの硫酸を排出するが、その全量は何らかの形で利用されているので製錬工程の環境対策は確立されていると考えられがちである。しかし、輸入する硫化銅精鉱の生産にボーフィリー・カッパー・鉱山では電気銅1tにつき400t余りの廃石、160tに及ぶテリングが廃棄されている。言い換えれば、我が国の年間産銅量110万tには実に6億tにもものぼる廃棄物を毎年現地に残してきている可能性のあることを示している。これに加えて製錬に使われる設備や製錬反応に必要な原材料、化石燃料、電力の生産に伴って発生する廃棄物についても同ような考え方が行えるであろう。

図2に銅鉱石品位が年代とともに低下してきた推移と電気銅1tを生産するのに要するエネルギー消費量が鉱石品位の低下とともに加速的に増加する様子が示されている。このことは将来図1(b)の分布曲線に沿って鉱石品位が低下して行けば、処理に必要な化石燃料資源の消費量は加速的に増加し、燃焼排ガスによる環境負荷とともに廃棄される廃石やテリングの量も平行して増加することを示唆している。

それゆえ、リサイクリングによる省資源を通して、現地における環境負荷の低減に寄与することは資源多消費国としての責務と考えるべきであろう。真に「成長の限界」は資源の枯渇よりはむしろ大量生産、大量消費社会の大気、水質汚染、廃棄物の最終処分による地球環境への負荷の方が憂慮事項になってくることは明らかである。

4. リサイクリングの問題点

我が国は長年にわたって大量消費が続き、金属の蓄積量が大きくなってきており、貴重な国内資源としてその活用を図っていく必要がある。リサイクリングはバージン原料から生産する場合に

表3 バージン原料を二次原料で代替した場合に得られる環境負荷の軽減効果 (Pollock, 1987)

環境負荷の軽減効果	アルミニウム	鉄鋼	紙	ガラス
エネルギーの削減	90～97%	47～74%	23～74%	4～32%
大気汚染の削減	95	85	74	20
水質汚染の削減	97	76	35	—
廃石の削減	—	97	—	80
使用水の削減	—	40	58	50

比べて省エネルギーであると同時に大気汚染、水質汚染による環境負荷を軽減できる可能性がある。その一例を表3に示す。アルミスクラップのリサイクルの例ではアルミ当たり90～97%の省エネルギー、95%の大気汚染、97%の水質汚染を軽減できることが示されており、リサイクルによる環境負荷軽減の可能性が示唆されている。しかし近年産業、殊に電気機器分野の革新に伴い、機能性の追求に複合材料の多様化に加えて除去困難なレアメタルを添加した合金の使用が増加し、リサイクルを複雑化して行く傾向にある。このような廃棄物からの再生には表3に示されているような大幅な環境負荷の軽減は期待できない。

金属のリサイクルには不純物の混入したまま適した用途に使ういわゆるカスケード方式の利用方法とバージン金属に近い組成まで精製する場合とが考えられる。後者の場合、処理費が高みバージン品より高価になる場合が多い。それゆえ、リサイクルの研究には、より経済的な精製技術の開発とともにリサイクルを念頭において材料の組成を選択し、また製品の素材別分離を容易にする設計が必要になる。

一般廃棄物のリサイクルでも同様に技術的に選別、再生ができて経済的、品質的に新製品と競争できない場合が多い。廃棄物の分別の程度には限度があり、一般にリサイクル製品は品質が劣り、見映えが悪く、価格も高くなる傾向がある。これに加えてリサイクルへの関心の高まりによってせっかく回収された再生用資源が滞貨して買取り価格が暴落し、一部逆有償の引取り現象すら起きている。近年の円高で輸入原料価格が低下したこと、人件費が高騰したこと、不況によって再生資源化市況が軟化したことが原因となっている。リサイクル法は単に再生用資源の回収に留まらず、新しい用途の開発も含めて促進して行く施策が望まれる。

その一例に古紙のリサイクルが脚光を浴びているが、古紙1tは樹齢20年の立木約20本分に相当するといわれ、世界各国のパルプ用チップ材の貿易総量のうち我が国の占める割合は80%以上とのことで(田中ほか, 1984)、古紙の再利用は森林破壊を防ぎ、環境保全に寄与できることになる。我が国の古紙利用率は54%と国際的にも高い水準にあるけれども、古紙の需要の伸び悩みで最近では在庫過剰により一部回収中止が報道されている。これは上質紙と同等の白色度80%以上への嗜好によるもので、70%に抑えれば上質紙より安価に生産でき、また表3に示されているように省エネルギーになるとともに大気汚染、水質汚染も軽減できることになる。再資源化を円滑に行うためには再資源化製品の市場確保が必要であり、そのためには消費者の意識改革が必要になってくる。現にアメリカでは国、自治体、公共関係の業務には再生紙の使用を義務づけており、一般企業間でもイメージアップに一部普及し始めている。

一般ゴミに混在するプラスチックの多くは埋立処分されているが、プラスチックは長年にわたって分解せず、また嵩張っているため土壌が安定せず埋立後の土地の有効利用に支障を来すことになる。そこでプラスチックの分別処理による減容化と分別した

プラスチックの再利用が望まれている。廃プラスチックのリサイクルはマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルの3方法に分類されているけれども、マテリアルリサイクルでは化学組成や性状の異なるプラスチックは限られた種類の組合せでしか再生できないし、ケミカルリサイクルでは解重合した低分子量体の再合成はコスト高になる制約がある。そこでプラスチックの高カロリー価を、エネルギー源とするサーマルリサイクルが経済的にも適切な利用方法と考えられている。この点高炉への吹込みは大量消化を可能にする方法で興味深い。しかし塩ビが混入していると塩化水素の発生による設備の腐蝕問題やダイオキシン類生成による大気汚染が懸念されている。またシュレッターダストについても混入する塩ビや重金属が焼却や埋立の環境問題になることから、物理的、化学的な分別処理がいろいろ検討されてきた。しかし現行の技術では混在するプラスチックをマテリアル、サーマルいずれかのリサイクルに適した純度まで分離する技術は確立しておらず、性状の異なるプラスチックの選択性のよい分離技術の確立が望まれている。

リサイクルや焼却処理による減容化で逼迫する埋立地の問題に対応しようとしても、廃棄物の発生自体を抑制して減量しなければ、ますます高騰する処理施設の建設費に対応が難しくなってくることは明らかである。それには過剰包装の回避、リターナブル容器使用の促進、ワンウェイ容器リサイクルの効率化への社会システムの確立が必要になる。空缶、空瓶の放置、ゴミ袋の不法投棄に対しては法規制による取締りの強化が望まれる。現にアメリカのハイウェイ沿いに散乱ゴミが見られないのは30年ほど前に始まった法規制の効果といえると思う。当時、アルミ缶が普及し始め、投棄されたアルミ缶は腐蝕によって土へ還元しないため美観を損ねるとの市民運動でゴミ投棄に厳しい罰則が掲示され履行されたことによる。またワンウェイ容器のデポジット制も市中での散乱を抑制する効果がみられているようである。それゆえ再資源化を円滑に行うためには技術の進歩とともに社会的な自覚を徹底させるような施策が重要な鍵となってくる。

5. リサイクル技術の開発

一般廃棄物の最終処分には無害化、減容化が不可欠で選別、焼却、熱分解などの処理法が行われてきた。産業廃棄物の処理も一般廃棄物の処理と大差はないが、発生源が特定されており、同一種類のものが大量に発生するため単一の分離処理により資源化できる場合が多いが、種類が多いので処理処分が一律ではない。

いずれにせよリサイクルを経済的に実施可能にするには廃棄物の特性に応じて適正な処理技術を選択せねばならない。リサイクルの技術には混在する素材を固体単位で分ける選別技術と元素単位で不純物を除く精製技術がある。選別技術はもともと天然鉱石に対して低コストである特徴を生かして乾式、湿式の化学処理の前工程として行われてきた選鉱技術に対応しており、長年培われてきた分離技術である。目的とする資源を濃縮して化学処理による高純度化を容易にし、また全体としてコスト削減に寄与するとともに化学処理により発生する環境負荷も低減してきた。

この選鉱技術は鉱物の大きさ、形、硬さ、脆さ、比重、光学的性質、熱的性質、磁性、電気的性質、放射性、表面の性質などさまざまな特性を利用して天然鉱石を分離する技術であり、これらの特性は廃棄物の分離にも広く用いられている。しかし廃棄物を構成する物質には天然鉱石と性質が大きく異なっている場合が多く、その技術を有効に利用するにはそれぞれの方法の特徴をよく理解して使うことが肝要である。延性展性により単体分離の難しい金属やプラスチック、セラミックスなどの複合材料、さらに

表4 セグレグーション法の廃棄物処理への応用例

	供試試料	焙焼条件	浮 選 結 果		備考
			精鉱	尾鉱	
含 Cu 廃棄物 溶錬炉・転炉 耐火物	12 ~ 15 % Cu	0.5 ~ 1 % NaCl 1 ~ 2 % 木炭 660 ℃, 30 分	67 ~ 87 % Cu 85 % Rec		
銅転炉滓	3.4 % Cu	1 % NaCl 3 % 木炭 750 ℃, 1 時間	ふるい網上 92 % Rec		
含 Pb 廃棄物 亜鉛浸出残渣	8.5 ~ 14 % Pb 0.01 ~ 0.02 % Ag	2.5 % NaCl 12 % 木炭 627 ℃, 1 時間	49 ~ 55 % Pb 90 ~ 97 % Pb Rec 80 ~ 90 % Ag Rec		PbS として 木炭上に 沈積
銅溶錬煙灰	19 ~ 25 % Pb 26 ~ 35 % Zn 3 ~ 5 % Cu	2.5 % NaCl 15 % 木炭 800 ℃, 4 時間	~ 50 % Pb 84 % Rec	17 ~ 20 % Zn 98 % Rec 1.5 ~ 4 % Cu 94 % Rec	同上

は生活系廃棄物の混入など従来の鉱石処理に使われてきた技術とは全く異なった考え方が必要となる場合も多く、一部独特な技術、例えば、冷凍破碎、渦電流選別、広義の色彩選別、磁性流体による比重選別などが開発されている。しかし現在のところ手選別に勝る選別手段はなく人件費の高い先進国では経済性が問題となつてこよう。そこで発生源におけるよりきめ細かな分別回収が必要になる。またさらに一時代前の鉱山でも手選別は重要な手段であったことを想起すると、今後手選別に代わる省力的な処理法の開発が期待される。

一方、精製技術には水溶液として行われる浸出、浄液、金属採取からなる分離技術（湿式製錬）と高温処理により行われる焙焼、溶融製錬および精製からなる分離技術（乾式製錬）がある。廃棄物の精製技術では天然鉱石にはない不純物の分離が対象となる場合が出てこよう。

これまで天然鉱石の処理には物理的な選鉱技術と、化学的な製錬技術は個別の学問的分野として発達してきた経緯がある。しかし、廃棄物の処理には複雑な合金を含む金属の組合せのみならず、プラスチックのような有機物との混合材、複合材料、さらには厨芥を含む廃棄物などがあって物理選別、化学処理、生物処理のより効率的な組合せや境界領域の研究が必要になることが想像される。このような組合せ処理によってこれまではないリサイクリング技術の創出が可能になるであろう。

一例として、選鉱製錬の組合せ、すなわち化学処理によって物理選別を可能とする技術を廃棄物処理に適用した方法にセグレグーション法とイオン浮選法が挙げられる（Iwasaki and Prasad, 1989）。セグレグーション法は、塩化物と固体炭素還元剤を混合して加熱することにより、塩化反応により揮発する金属塩化物が固体炭素表面で還元されて金属または硫化物として析出し、浮選または磁選などの選鉱技術により分離する方法である。製錬所で排出する非鉄金属含有廃棄物へその適応性を試験した結果の例が表4にまとめられている。このような塩化反応は廃棄物の焼却により発生する塩化水素との組合せ処理への展開も考えられよう。イオン浮選は廃水中に存在したり、湿式処理により水溶液に溶解した金属イオンを pH 調節、硫化ソーダあるいは浮選用捕収剤を使って沈殿させ、浮選や磁選により回収する方法であり、特異な

応用例として廃水中の6価クロームの直接除去にカチオン系界面活性剤の使用も提案されている。

6. ま と め

資源やエネルギーの大量消費やその確保に起因する地球環境への影響が大きくなるにつれ、リサイクリングへの関心が高まっている。近年の産業構造の変革は多様化する人工材料、複合材料や特殊組成の合金の使用量が増加し、リサイクリングを複雑化している。このような廃棄物や焼却灰、焼却残渣の埋立処分は深刻な政治、社会問題になってきた。しかし、観点を変えれば廃棄物は貴重な国内資源とみなすことができ、その再利用、再生は国内のみならず、グローバルにも省資源、省エネルギーを通して地球環境保護へ寄与することになる。一般廃棄物のリサイクリングにおける大きな課題は回収資源の利用先が整備されていないことである。次世代へ向けて持続的な成長を可能にするためにもリサイクリングの技術的な体系と社会体制を確立することが望まれる。

引 用 文 献

- 秋山伸一（1993）：資源と素材，Vol. 109，p. 457-467
 Alter, H. (1997) : Resources, Conservation and Recycling, Vol. 19, p. 29-53
 Govett, M. H. and Govett, G. J. S. (1978) : Resources Policy, June 1978, p. 106-113
 廃棄物学会（1995）：ごみ読本，中央法規（東京），293 p.
 Iwasaki, I. and Prasad, M. S. (1989) : Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 4, p. 241-276
 Meadows, D. H., et al. (1972) : The Limits to Growth, Potomac Associates (Washington, D. C.), 207 p.
 National Research Council (1996) : Mineral Resources and Sustainability, National Academy Press (Washington, D. C.), 26 p.
 西山 孝（1993）：資源経済学のすすめ，中公新書（東京），188 p.
 大橋照枝（1997）：日本企業，環境行動急げ，日本経済新聞，1997年5月22日
 資源リサイクリング部門委員会（1995）：廃棄物再資源化のための選別技術，資源・素材学会，66 p.
 資源リサイクリング部門委員会（1996）：廃棄物再資源化のための化学処理技術（乾式・湿式・生物処理），資源・素材学会，58 p.
 Skinner, B. J. (1976) : American Scientist, Vol. 64, p. 258-269
 田中栄治・山本耕平・米村洋一（1984）：リサイクルハンドブック，中央法規（東京），216 p.
 Williamson, D. (1997) : SME Annual Meeting Preprint 97-141, Denver, Colorado, February 24-27, 1997