

## 非鉄金属材料のリサイクル

Recycle of Non-Ferrous Metals

前 田 正 史\*

Masafumi MAEDA

リサイクルと地球環境はきわめて現代的な、先進国の問題である。ローカルな市民運動的な活動が本当に環境保全につながるのだろうか。全産業、全人類の生活のマテリアルの流れを考えたもう少し現実的な回答は、材料の人間界における延命策をはかることである。自然の時計は現在の工業文明の時計とは明らかに歩みが違い、使い捨てしている物質の量の大きさはもはや通常の太陽エネルギーを用いた自然界のサイクルでは回生しきれない量である。後始末も含めて工業技術が自分の手で保持して行かねばならない。単一使用ステップにおける寿命を伸ばし、最小エネルギー負荷でカスケードして行く事を考えなくてはならない。

## 1. 非鉄金属のリサイクル

非鉄金属材料のリサイクルは、マーケットサイズが小さいこともあって、比較的取り上げられることが少ない。リサイクルというとむしろ製品が絡むもので、せいぜいアルミ缶のリサイクルが新聞にぎわす程度である。牛乳パックの話は出てもおおよそマスコミに銅や亜鉛のリサイクルなどというものが出てくることはない。

子どもの頃、磁石を腰から紐でつるし、古釘金などを集めて屑屋に持ってゆき1円2円貰ったことがある。東京の下町というか、場末である。今から思えば、あの屑屋さんもそれだけ価値があると思ってお金をくれたわけでもないだろう。そのとき覚えていたのは、あか、という言葉である。あかは高いから、といわれた。しんちゅうもいいよ、とも言われた。家の近所にはどぶ池があり、池の泥の下から昔の高射砲の薬莖などがあり、中学生などはこれを拾っていた。これは金色をしていて、しんちゅうだといっていた。あかは、線が多かったように思う。焼けこげた電線みたいなものが店に積んであった。もちろんあかとは、銅のことである。

鉛もよく屑屋にあった。鉛管である。生研もそうだが、古い建物にはまだ排水管に鉛管が使われている。多分、当時はよい値段で取引されていたのだろう。いま、鉛バッテリーがそこにあっても誰も拾わないだろうし、もし拾ったとしても町の屑屋はもうないし、あったとしても有害ごみ処理として金を払わねばならないだろう。したがって、わ

れわれが今問題とにしようとしているリサイクルは、市場価値のあるものを集めようと言うことではない。自分たちの生活している“まち”の市場では価値はないが、地球全体としては捨てるてはならない、そう言うきわめて遠い価値を想像しながら事業化しなければならないのである。

上に書いたことには誇張がある。非鉄金属は、一般廃棄物に回るものより、加工段階で排出される加工屑が圧倒的に多く、これらは工場内あるいは、工場間リサイクルされている。銅、アルミに代表される非鉄金属は、鉄に比べればはるかに低融点で加工現場における再溶解が容易である。鉄より値段は高く再溶解は容易であるので、十分純金属、二次合金市場ができるのである。

## 1.1 金属材料のマーケットサイズ

もちろん鉄が最大のマーケットを持つことは疑いもない。図1は、若干古いものであるが大きな差はないであろう。したがって、資源として考慮しなくてはいけないのも鉄が筆頭であろう。次に大きいのは、アルミニウムそして銅である。

亜鉛、鉛が続くのであるが、最近の新聞紙上を賑わせているように鉛はもはや価値をなくしてしまった。つまり、廃バッテリーが主たる流通鉛なのであるが、国内生産再生鉛が過剰にあり新鉛は生産を縮小している。バッテリー処理もバッテリー鉛がアンチモン添加からCa添加鉛に成分転換が行われたため、技術的についてこれなくなり、町の中小鉛回収業者が廃業しているようである。量が多いのであるが、ローカルな加工度が高すぎて問題を起している

\*東京大学生産技術研究所 第4部

Metal	Size (\$Billion)
Iron and Steel	200
Gold	25
Aluminum	20
Copper	17
Lead	4
Nickel	4
Silver	4
Tin	4
Zinc	4
Uranium	2
Molybdenum	1.5
Platinum	1.2
Cobalt	1
Manganese	1
Titanium	1
Magnesium	0.7
Chromium	0.5
Tungsten	0.5
Columbium	0.3
Tantalum	0.3
Vanadium	0.2

図1 金属資源の世界市場

例である。

その他の非鉄金属特にレアメタルと総称されている物のリサイクルは、その複合化された使われ方と絶対量の少なさから、前述の加工度が高く量が少ないという負の遺産を2つも背負っていることになりとても経済原理に則った活動としての回収リサイクルは成り立たないと推察される。特に軍需産業のない日本では、スーパーアロイやチタン系

のアロイのリサイクル再利用つまりマテルアルリサイクルは困難である。工具鋼や合金鋼に非常に多くの規格を作り多種類少量を流通させている現状はおよそリサイクルの観点から言えばナンセンスである。貴金属は、加工度がきわめて低く言ってみれば純物質もしくは規格を厳密に定められたその合金が、ある種の検定制度のもとで、流通しているわけであるので十分産業として成立する。貴金属として国際的に流通できる規格は、ISO9202に規定されている。各国の規格もあるが、その数は少なく、流通市場で混乱することはない。

## 1.2 金属素材元素の特徴：親銅，親鉄，親石元素

ベースメタルとして代表的な、鉄、アルミ、銅を資源工学的見地から示したのが表1である。生産量のうち括弧付きのものが、日本におけるものである。アルミニウムについては国内製錬をほとんど行っていないため、一次金属として輸入しているものを含めた。鉄がぬきん出て大きな生産量であることは、クラーク数から言っても当然であるが、アルミニウムに比べて銅がきわめて低い資源量にもかかわらず、生産量が多いことがわかる。必要エネルギーはアルミがもっとも高く、銅、鉄の順で下がる。副産金属がポイントであるが、鉄、アルミはほとんどないが、銅は、親銅元素つまりアルコフィル元素を随伴する。

ゴールドシュミットは、金属元素を、親銅元素、親鉄元素、親石元素と分類した。その字のごとく銅に近く硫化物質源として存在する。鉱物学的にも銅鉱石に随伴されることが多い。親鉄元素は、鉄に近い性質を持った元素で容易に炭素還元できる。親石元素は、まさに石になりやすい元

表1 ベースメタルの資源工学的比較

	銅	鉄	アルミニウム
歴史	6000年	4000年	100年
年生産量千トン, 1991年 (日本)	10,700 (1,076)	733,000 (109,000)	18,478 (2,548/32)
クラーク数	0.0055	5.00	8.13
採掘可能品位	0.5%	25%	
精鉱標準品位	Cu : 28%, CuFeS <sub>2</sub> : 80	Fe : 56%, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 80%	Al : 28%, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 53%
製錬エネルギー (10 <sup>3</sup> kJ/kg)	46 (126) ( ) 内は平均品位0.7%から28% まで選考するエネルギーを含む	25	222
副産金属	As, Ni, Se, Te, Pt, Ag, Au, Mo	なし	Ga
スクラップ (日本)	1,100 1986 (120) 1986	233,000 (29,000)	2,850 1984 (1,024)
鉱石輸入依存率	99.5	100	100

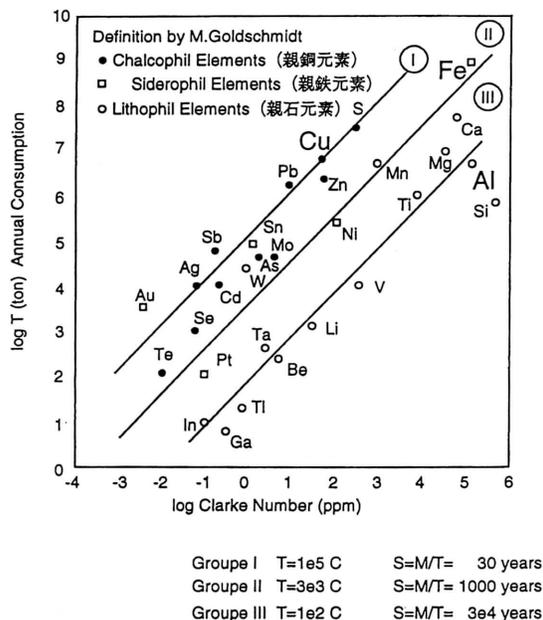


図2 ゴールドシュミットの種類

素でアルミはその代表である。酸化物を還元して純金属を得ることはきわめて困難である。非鉄金属材料の代表は、親銅元素の銅と、親石元素のアルミである。

図2が、各元素を分類層別にしたものである。縦軸年間消費量、横軸クラーク数である。親銅元素がその存在量が少ないにもかかわらず大量に使用されていることがわかる。有用だから希少でも探す。金や銀が代表的である。資源量から見ると、親石元素、親鉄元素、親銅元素の順で存在し、資源として利用可能な年限は、万年、千年の桁が、親石、親鉄である。それに対して親銅元素はきわめて厳しい状態で、多く見積もっても100年の桁である。

親銅元素はあまりありがたくない元素を常に随伴して地下資源から掘り出される。硫黄はもちろんであるが、砒素、カドミウム、鉛、アンチモン。これら元素が市場で滞留し循環している間は問題がない。地中で安定していることと同じだからである。しかしもし、金属分を廃棄してバーゲン鉱石から作り続けるとしたら、これは結果を語る必要はないだろう。

親鉄元素は、回収することが社会的にコストが見合うなら回収したらよい。そうでなければ廃棄しても大した問題は起こさない。資源的に豊富であるし、製造するのにそれほどエネルギーは必要ないからである。ただし炭素還元を行うので炭酸ガスの排出を抑制する必要が出てくれば、親銅元素と同じ制約を受けることになる。

親石元素は、何しろエネルギーコンシャスである。製造するために電気エネルギーが必要である。また活性金属であり、一度汚染されてしまうと回生することが困難である。

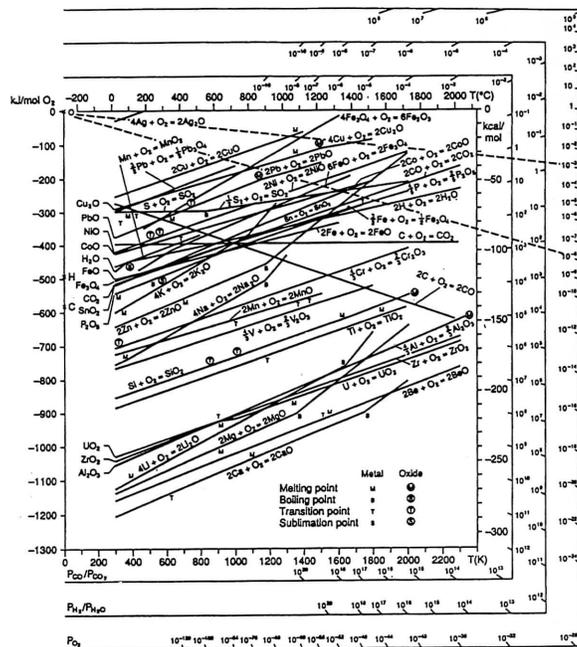


図3 酸素1モルあたりの酸化物生成標準自由エネルギー変化

あまり手間暇かけて精製しても結果はよくない。そのまま捨てても害毒はない。しかしもったいないのでそうは行かない。リサイクルする度に順次グレードを下げた用途につうかカスケード使用をなるべく多段で行い、市場滞留時間をなるべく長くし、最後はその酸化熱で回収するのが正しいだろう。アルミ、チタンで言えば製鋼用脱酸剤がおそらく最後の姿である。

### 1.3 金属の歴史と製錬原理

歴史的に、人類が金属を手にしたのは、金、銀、(錫、亜鉛、鉛、銅)、鉄の順である。資源の分布状況などにもよるだろうが、基本的には酸素との親和力と熔融加工性のよさの順番である。天然に自然金、自然銀、自然銅が存在するし、銅酸化物はきわめて容易に炭素で還元できる。その硫化物を空気により酸化製錬し粗金属を得ることもできる。これらの金属はいずれも酸素との親和力は弱い。鉄は炭素により容易に還元され、還元生成物である鉄がかなりの炭素解度を持ち、炭素含有鉄は比較的低い融点を持つ。鉄炭素合金の鋳物は比較的容易にできたのである。炭素を含まない鉄つまり銅を溶融状態に手にしたのはごく最近19世紀のことである。

純金属と酸素との化合物つまり酸化物相の安定性(自由エネルギー差)を、温度の関数で示したものを図3に示す。下にあるものほど酸化物が安定である。金、銀などの貴金属酸化物は、自体が不安定で図にはない。上から順に、銅、鉛、ニッケル、コバルト、錫、鉄、アリカム、亜鉛、ナトリウム、マンガン、シリコン、チタンと並んでいる。金、

銀、錫、亜鉛、鉛、銅のような“古い”金属は、このダイアグラムでも上の方である。またこれらの金属は融点が低く酸素の溶解度も低いし、炭素の溶解度もほとんどない。さらに炭化物も生成しない。

比較的低い温度でも、炭素の酸化反応(CO生成)線より上にあるので酸素を炭素で奪うことができる。すなわち炭素還元が可能である。過剰な炭素が存在しても、過剰な酸化物が残留しても、酸素、炭素いずれの溶解度も低いため金属としての実用性に問題のないものが取得できる。このように、恵まれた性質を持った金属であったのである。これらの“旧”金属に比べ“新”金属と言われるアルミ、マグネシウム、シリコン、チタン、などは図の下の方にある。アルミニウム、マグネシウムは電解法で酸化物あるいは塩化物を電解採取する方法でむりやり製錬している。きわめて高品質のエネルギーである電力を使用してはじめて製造できたのである。チタンはさらにそのマグネシウムを用いて塩化物を還元している。

#### 1.4 銅系材料のリサイクル

本当は銅はリサイクルの優等生である。電気部品に使われているものは純銅であるし、伸銅製品もほとんどが、黄銅、純銅である。合金の種類は他の材料に比べれば少ない。値段も高く、本質的にリサイクル品が流通しやすい環境が整っているのである。貴金属なのである。

わが国における銅生産量は約110万トンで、そのうち12万トン程度がスクラップとして分類されている。消費はおよそ150万トンであるといわれている。表1を参照されたい。ただしこのスクラップ率は製錬所で使用投入しているスクラップで本質的なものではない。いわゆる山元返しで、廃棄物なのか、金属原料なのかすれすれのものである。電子部品スクラップ、故銅の程度の悪いもの果ては銅含有スラッジである。

これらのリサイクル原料から混入する不純物は亜鉛、スズ、鉛、ニッケルである。亜鉛、鉛はもともと銅製鋼に入っているものであるし、スズ、ニッケルは製錬工程で銅に分配されない。したがって、リサイクル原料が製錬負荷を高める要因は、不純物の観点ではない。むしろ、スクラップ中に混入している非金属、ガラス、土砂、陶磁器、プラスチック、紙などと、その形状の不安定さが大きな問題である。

リサイクルの主流は、実は電線屑、伸銅屑、鋳物屑で、これらが市場で電線、伸銅原料としてカスケードされている。かなり古い統計だが、87年で、銅屑が約50万トン消費され、銅合金屑(黄銅がほとんど)も50万トン使われている。銅分がおおよそ60%と見積もれば、30万銅トン。合計80万トンである。国内の銅消費量が150万トン程度であるので、おそらくリサイクル率は50から60%であると推定される。

非鉄金属の地金の値段を表2にしておく。表の値段を見ればそれが想像できるだろう。新ものと流通ものにほとんど値差がない。価値が低く廃棄されている銅資源の多くは家電製品と自動車である。

家電製品の中でも、リサイクル法によって第1種指定を受けたエアコン、テレビ、冷蔵庫、洗濯機の大型品が重量の80%、容積の90%をしめる。最近の調査で、廃家電にはおおざっぱに言って5%程度の銅が含まれる事がわかっている。1990年度における廃棄量は約50万トンである。つまり、家電廃棄物から発生する銅は2万5千トンである。金額して5億円。ちなみにアルミニウムは約4%で2万トンである。

廃自動車は今や社会問題化している廃棄物である。かつてはスクラップ業者がスクラップ代として代価を出していたが、現在はほぼ0である。つまり引き取りにくい代わりに代金は無い。それでも回収業者にとってはきわめて厳しいコストである。多くの廃車は解体部品を除いたあとシュレッダーにかけられる。部品のうち銅に関わるものはラジエーターである。量的な把握はしていない。シュレッダースクラップとして、金属分は回収される。その成分は車100台あたり、アルミ3300キロ、純銅250キロ、黄銅200キロである。廃車はわが国で毎年500万台発生する。したがって、シュレッダー屑としてもアルミ17万トン、銅1万2千トン、黄銅1万トン発生することになる。

表2 銅系非鉄金属の値段 1993

地金	電気銅	万円/トン
銅類	1号銅線	19
	新切上銅	17
	上銅	15
	並銅	12
	下銅(64%銅)	11
黄銅	新黄銅(セパ65%銅)	15
	新黄銅(コーベル60%銅)	13
	黄銅棒材(時計バンド70%銅)	13
	黄銅鋳物	10
	並黄銅	4
	黄銅ラジエーター	4
	黄銅削り粉	13
	黄銅鋳物削り粉	7

三井金属より(1993)

## 1.5 アルミのリサイクル

日本における総需要量は1992年で367万トンである。このうち新地金が約230万トン残りがいわゆる二次合金である。国内発生分は約100万トン、残り30万トンが輸入二次合金である。二次合金とは、回収された発生屑や市中屑を再溶解し、成分調整した後成形した商品である。工場で発生する新しい屑は、ほとんどが圧延用途で使われている。市中屑はほとんどが二次合金にまわされている。

表3にはどの用途にどの程度の二次合金、新地金が用いられているかをまとめている。電線、圧延品、鍛造品等品質、加工の厳しいものはほぼ新アルミ、鋳造品は7割程度、ダイカストはほとんど2次アルミといってよい。製鋼脱酸剤は、最終的にはサーマルリサイクルでアルミの持っているエネルギーを回収できるのであるが、製鋼段階での不純物管理が結構厳しいため、新アルミ使用比率が高い。

表4に国内アルミ屑の需給状況を示した。発生屑と呼ばれる工場内加工屑が約半分である。このスクラップは組成もわかり管理しやすい。回収屑は玉石混淆である。建設屑、

表3 二次地金使用割合 (1992年) (単位:千トン)

プロセス	新地金(A)	再生地金(B)	合計(A+B)	比率(B/A+B) %
圧延品	1817	203	2020	10.0
鋳造品	126	277	403	68.7
ダイカスト	33	675	708	95.3
鍛造品	26	4	30	13.3
電線	88	5	93	5.3
脱酸剤	35	75	110	68.2
その他	149	31	180	17.2
合計	2274	1270	3544	35.8

軽金属統計年表 (1993.3)

表4 アルミニウムくず国内需給量の推移 (単位:トン)

		1989	1990	1991
需要	内需	2,368,764	2,551,747	2,605,442
	輸出	9,893	7,751	6,874
	合計	2,378,657	2,559,498	2,612,316
供給	発生	1,318,852	1,409,014	1,451,298
	回収	967,421	1,045,778	1,063,512
	輸入	400,340	352,699	291,758
	合計	2,686,613	2,808,391	2,806,568
在庫	販売業者	14,740	13,066	10,109
	消費者	99,994	98,086	87,947
	合計	114,734	111,152	98,056

日本アルミニウム連盟 アルミニウム圧延製品ポケットブック (1992)

自動車屑、そして飲料缶系の屑である。表5には、各分野のリサイクルの状況を示した。

屑の値段は二次合金レベルではほとんど新地金と変わらない。最近の円高で新地金の値段が下がっていることが、全体の相場を下げている。リサイクルという話題に出ている飲料缶は量的にはあまり重要ではない。表7にあるように、圧延品を20万トン使っているにすぎない。アルミ総需要の6%程度である。しかし、その回収率は年々上がり92年では50%を越えた(表7)。米国での回収率が高いのはおそらく、デポジット制が適用されていることと、鉄缶が無く収集が容易であるためであろう。飲料缶はボディとふた部で異なる合金を使っている(表8)。屑ではこれらが混

表5 各分野におけるアルミの環流状況

分野	製品	ライフ	リサイクル現状	備考
輸送	自動車, 船舶, 鉄道	5年	80から90%	解体業者経由でほぼ全量リサイクル
土木建設	サッシ	15年	90から100%	同上
食料品	飲料缶	1月	40%	リサイクル運動中
金属製品	印刷版, その他	1年	30から40%	
箔	包装, 電子材量	1年		分離が困難
電力	電線	20年	100%	全量二次合金

日本鉄鋼協会:資源リサイクルの現状と将来 (1992.11)を改竄

表6 アルミニウム新地金, くず, 二次地金の価格推移 (単位:千円/トン)

年度	新地金	鋳物くず	二次地金 (ダイカスト用 ADC12)
1989	270~330	205~235	305~330
1990	230~330	181~210	280~305
1991	172~230	115~185	200~285
1992	165~203	110~135	190~215

表7 日本におけるアルミニウム飲料缶(UBC)回収率の推移

年度	総則売量(缶数)	溶解重量(缶数)	回収率	米国の回収率
	トン(百万缶)	トン(百万缶)	%	%
1981	31,680 (1,584)	113093 (556)	35.0	53.2
1982	40,629 (2,031)	15,994 (797)	39.4	55.5
1983	45,422 (2,272)	18,266 (913)	40.2	52.9
1984	53,645 (2,682)	21,789 (1,089)	40.6	52.8
1985	60,482 (3,024)	24,549 (1,227)	40.6	51.0
1986	69,986 (3,500)	28,848 (1,442)	41.2	48.7
1987	109,644 (5,482)	45,498 (2,275)	41.5	50.5
1988	149,035 (7,452)	623150 (3,107)	41.7	54.6
1989	147,560 (7,378)	62,766 (3,138)	42.5	60.8
1990	161,185 (8,059)	68,612 (3,431)	42.6	63.6
1991	180,256 (9,013)	77,723 (3,887)	43.1	62.4
1992	197,824 (9,891)	106,488 (5,324)	53.8	67.9

廃棄物学会誌 vol. 4 No. 4 p304 1993

表8 飲料缶素材の合成組成 (%)

飲料缶	合金名	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
ボディ エンド	3004	0.30	0.70	0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	—	0.25	—
	5182	0.20	0.35	0.15	0.2~0.5	4.0~5.0	0.10	0.25	0.10

合された形になるため、缶スクラップを再び缶にリサイクルすることは精製コストがかかる。基本的には、親石元素であるから、エネルギーの値段分回収できれば、金とエネルギーをかけて alloy to alloy をめざす必要はないと考える。

## 2. 人工環境論とリサイクル

### 2.1 自然環境と産業

人類は自然環境に適応してきた。自然環境から動植物資源を採取し使ってきた。不要な物は自然環境に廃棄して、生息圏を守ってきた。人間の生物経済活動の終末処理は自然にまかせてくれたのである。つまり人間の活動も自然の生体系の一部として、太陽をそのエネルギーの源とする自然環境の代謝のある部分を担っていたにすぎなかったのである。

人間が他の動物と異なる大きな特徴は、道具を使うことであるという。もっと言えば、天然資源を別の形にして用いる技術を持った生物であるといえるだろう。貴金属は有史以前から利用されてきた。銅はその合金とともに6000年の歴史を持つ。

産業革命以降人類はきわめて大量のエネルギー資源や鉱物資源を自然環境から採取し、有用物は利用し、無用な物は廃棄物として捨ててきた。酸化物の金属製錬で言えば、酸化物を還元し、炭酸ガスを排出し、無用な夾雑物は分離廃棄された。あるいは、銅に代表される硫化物鉱石はそのまま酸化する事で金属を得た。ある時代は廃棄硫黄はそのまま亜硫酸ガスとして放出された。

生産量は確かに大量になったのである。しかし、この範囲における生産活動は、自然環境からの取得と排出の価値の差から成立してきた産業であった。自然環境の理の中にある活動であったのである。ごく最近に至るまで、およそ“自然”科学が産業活動の指導原理として役立っていたであろう事は間違いない。ここで言う“自然”科学は、もちろん自然環境を前提にした科学すべてである。知識といってもよいかも知れない。したがって“自然”科学は、自然環境を前提にした社会活動を取り扱うこれまでの社会科学、もちろん価値の流通つまり経済学も例外ではない。

参考までに現在世界で人類が採掘消費している資源を概観しておく。併せてわが国で消費している資源も示しておく。いずれも世界国勢図会を元に算出したものである。

### 2.2 人工環境：先進国の都市は人工環境科学が支配

人工環境とは何のことなのか。自然環境がなにであったのかももう一度振り返ればわかりやすい。ここでは主に工学を取り扱う範囲に限定しておいて考えよう。産業革命以前の工学環境とは、まさに自然環境で気候、水、海運、天然資源であっただろう。現代の都市は違う。気候の代わりに人工的なエアコンディションを実現するエネルギーライン、通信ネットワーク、上下水道ライン、物流用インフラ、そして廃棄物である。

物理的な資源の集合である自然環境に対して、人工環境は高度に論理的なシステムの集合である。通信ネットワークインフラが整備された環境では物理的なデバイス、生産設備の配置は大きなポイントではない。物理的に運ぶ必要のないパワーラインや、利水排水が物理的な土地の配置に依存しない上下水道線、河川や港ではなく道路、鉄道その他の流通インフラが、工業生産を規定してゆく。廃棄物ですら論理的な物である。たとえば、管理型廃棄物と定義した瞬間にきわめて廃棄コストの高い物体になる。どんなに危険な物でも、投棄可能としてしまえば、きわめて安価に廃棄できる。その定義は、われわれに任されているのであって、神が決めているのではない。つまり人工環境なのである。

このような人工環境が整備されているのは先進工業化都市である。そこで使用されている現代の工業製品といえど、これまでは、おそらくほとんど産業革命時代とそうかわらない自然環境とその経済原理で生産されているであろう。天然資源と天然エネルギーを用いて。しかし、製品が使用されている都市では、もはや自然環境は環境でなくなっている。最終処分地として再び工業生産地の自然環境が利用されることになれば、(実はこれが現実であるが)、消費のツケはすべてやはり自然環境に負わせることになる。海洋投棄は、この典型であるし、産業廃棄物の都市から近県への移動、あるいは発展途上国への輸出もその一つである。

もちろん、最終末の処理を自然エネルギーである太陽エ

表9 日本の大規模資源消費量

資源	億トン	年度
碎骨材	3.45	1985
石灰石	1.64	1985
セメント	0.89	1991
石材	1.20	1985
珪石	0.14	1985
輸入原油	1.89	1990
輸入鉄鉱石	1.17	1991
硫酸	0.69	1990
苛性ソーダ	0.37	1990
塩酸	0.23	1990
米	0.11	1991

表10 世界の物質資源消費量

	億トン	1991	
エネルギー資源 (石炭換)	76.02		
		石炭	35.38
		石油	27.86
		天然ガス	12.78
			1990 1990 1983
			日本の総輸入量3.05
食物	27.24		
		穀物	19.6
		肉類	1.82
		卵	0.35
		牛乳	4.5
		水産物	0.97
			1992 1992 1992 1992 1992
木材	32.52		
		薪炭	18.3
		用材	15.99
		製材合板	10
		パルプ	5.99
			1992 1992 10 推定 5.99 推定
石灰石	11.91		
セメント	11.3		
鉄鋼石	9.93		
粗鋼	7.33		
銅鉱石+ズリ	4.03		
ボーキサイト	1.08		
塩	1.86		
肥料	1.48		
硫酸	1.49		
繊維	3.51		
		綿花	1.7
		合成	1.24
		羊毛	0.3
		再生	0.3
			1990
天然油脂	0.51		
			1987
ゴム	0.13		
		天然	0.04
		合成	0.09

エネルギーにまかせるこの方式が、速度論的に同じようには続かないことは明白である。ローマクラブが1972年に成長の限界を報告した事は、われわれの記憶に新しい。当時の結論はまったく正しく、実にわれわれは報告にあるとおり後追いつている。天然資源エネルギーを採取し、組み合わせて、不要物を自然環境に戻す、これが“自然環境”科学の結末である。

### 2.3 リサイクルと廃棄

人工環境科学は、非常に広い概念であるが、ここでリサイクルにかかわるのは、われわれが生産している物の最終処分まで境界条件を広げて価値、生産活動を考えて行こうとする体系である。われわれが使用しているエネルギーが再生不能である以上完全リサイクルはあり得ない。この事は周知の事実であるが、近視眼的な理想論が時に目に付くのは残念である。したがって、最終的には何らかの廃棄物を出すわけである。この前提で、リサイクルとエネルギー

について考えることが必要である。

カスケードリサイクルが重要な概念である。製品のライフタイムを最大限にのばすことが必要である。まず、製品のリサイクル、次に部品のリサイクル、そして材料のリサイクル、いわゆるマテリアルリサイクルである。そして化学物質としてのリサイクル(ケミカルリサイクル)、最後に熱源として利用できる場合は燃やす(サーマルリサイクル)。そして、無害化できる残滓は廃棄する。各段階で使用するエネルギーは発生するエミッションを最低にし、有限の環境を保存、延命してゆく。

自然環境下でエネルギーが最小になるように考えられたプロセスは、もう全体のエネルギー最小化にはつながらない。例えば塩素処理が行き詰まった段階でソーダ電解を中心とする工業化学品サイクルは成立しなくなる。発生塩素は塩どで固定化されているのである以上、塩ど処理が不可能になれば、これがまさに新しい人工環境の境界条件である。

かつて物流量がきわめて乏しい頃は、資源は都市においても十分繰り返し利用されてきた。いかげや、らうや、ろうそく、紙、瀬戸物(やきつぎや)、などである。尿尿に代表される有機物も有価で流通していたことはわれわれでも覚えがある。現在でも、快樂利便をあらゆる意味で抑制すれば最低エミッションの生活は可能である。鎖国である。しかし、これは国民の合意は得られないであろう。

廃棄物の拾い屋スカベンジャーは、その値段が折り合うところでは、塩ビの袋でも回収する。ちり交予備群は古新聞の値段が安い間は別の仕事を行っている。もし回収がここで言うエミッション最低の条件を満たすのであれば、回収という行為が価値を持たねばならない。価値を与えることができれば、仕事の創造が行われる。回収業の認知と社会的コストの周知が、焦眉の急である。非鉄金属の回収リサイクルも例外ではない。

#### 2.4 価値の逆転：リサイクルの原点

多屋(多屋貞男：エコマテリアル研究会第3回ワークショップ資料1994. 3. 17)は、自動車起因の部品、スクラップについて、リサイクルにおける逆転現象として次のようなものがあると発表している。きわめて興味深い内容であるので引用させていただく。また鈴木(鈴木清二郎：エコマテリアル研究会第9回ワークショップ1994. 9. 29)が、特殊鋼の流通についてまったく同様の見解を示されたことは驚異である。

- 売り手買い手の逆転：スクラップ市場に定常的に存在する売り手市場。リサイクルを行うためにはまず回収しなくてはならない。つまりリサイクルを業とするものにとっては仕入れである。売るあてのないものは仕入れることはあり得ないので、スクラップ業における営業とはすなわち仕入れ活動である。販売活動は無視できないにしても二義的な意味しかない。
- 量の逆転：通常の商品マーケットでは希少性が、価値を生むことが普通である。たとえば貴金属であり、ダイヤモンドである。ところがスクラップは違う。同じものをたくさん集めた方がはるかに価値が高くなる。たとえば、アルミ缶1つ2つではまったく価値を生まない。むしろごみとして処理する費用がかさみマイナスの価値を持つ。しかし、数万個集めると商品価値を持つ。数万トンになれば資源になる。
- 集荷と出荷のマーケットの差：価値のきわめて低いものを集める集荷は徹底的にローカルである。スクラップを集める場所はコスト的に近在でしかあり得ない。ところ

が、再生され資源化されたとたんその品物は、国際商品となり、国際市場で価格がきまる。極小市場から集められた資源が地球全体のマーケットで流通する。

- 加工度の高いものほど価値が低い：製品が流通する場合、加工度の高い物は付加価値をより多く持つ物として高い値段が付けられているのが普通である。しかし、スクラップは違う。鉄で言えば、何の加工もしていないビレットのクロップがもっとも高く、冷延鋼板、メッキ加工鋼板、プレス屑くらいまでが商品価値の限界で、ペイントが塗られて、汚された缶屑にいたっては、ほとんど価値はなくなる。複合材料などはもっともひどいことになる。価値はおろか、負の価値を持つことになる。

以上の逆転の構図は、現時点での境界条件で成立しているのであって、別項で述べたように新たな価値を導入した場合には、別の流れを作ることができるのは当然である。

### 3. 最後 に

リサイクルと地球環境はきわめて現代的な、先進国の問題であることは、これまでの議論で明らかになったと思う。ローカルないわゆる市民運動的な活動で、牛乳パックを集めることが本当に環境保全になっているのか、アルミ缶をリサイクルすることに意味があるのか。全産業、全生活のマテリアルの流れを考えたもう少し現実的な回答を、プロセスを専門とするわれわれは出さねばならない。

われわれの回答はきわめて明らかである。材料の人間界における延命策をはかることである。自然の時計は現在の工業文明の時計とは明らかに歩みが違う。使い捨てしている物質の量の大きさはもはや通常の太陽エネルギーを用いた自然界のサイクルでは回生しきれない量である。後始末も含めて工業技術が自分の手で保持して行かねばならない。単一使用ステップにおける寿命を伸ばし、最小エネルギー負荷でカスケードして行く。

究極の地球環境保全は全人類の滅亡である。われわれ人類はすべていなければ、環境はそのまま保全されるだろう。天敵のない人間にとっての天敵はまさにこの限られた資源環境そのものなのである。“成長の限界”の、その原因を人類の人口問題と喝破したローマクラブの先見性に改めて敬意を表するとともに、この間20年以上本質的になにもしてこなかった先進国首脳、特に日本とアメリカは、反省すべきであろう。ロシア、中国に対してはさらに大変な教育負荷を背負うことであろう。

本稿の内容については本所増子昇教授との討論で多くの知見を得たことを記しておく。(1994年12月19日受理)