

professional report

# 資源枯渇時代に備える 地上資源リサイクル

Recycling of Terrestrial Material Resource to Address Natural Resource Limit

馬場 研二 Kenji Baba

温暖化、資源枯渇、環境汚染などの地球環境問題の中で資源枯渇問題を解決する指針について述べる。地下の金属資源は化石燃料とともに急速に採掘・消費され枯渇していく。しかし、金属資源は存在場所を地下から地上に移行しただけであって、地球上から消えてなくなったわけではない。このため、地上に移行した資源をリサイクルする「地上資源リサイクル」が有効な解決手段となり得る。地上の資源は地下資源ほど便利に使えるものではないが、地下資源が枯渇する以上、地上資源に依存するしかない。家電リサイクルですでに地上資源をリサイクルしている。今後の法規制と連動しつつ、資源の循環的利用に積極的に取り組みたい。

1978年日立製作所入社  
新事業開発本部 資源循環推進室 所属  
現在、日立グループ資源循環スキーム  
の構築に従事  
工学博士



## 1 はじめに

今後100年を見通したとき、地球温暖化と資源枯渇は解決すべき喫緊の課題である。この中で、本稿は、資源枯渇を克服するためには地下資源を採掘する量を減らし、地上に存在している資源を循環利用していくコンセプトについて述べる。これは、筆者が家電リサイクル事業に約10年間携わった経験がベースになっている。このコンセプトにたどり着いたのは、従来、廃棄物と見なされていた家電製品を分解し、物理的選別方法を組み合わせ、ほとんどのものを再生し、資源として活用できることを経験したからである。

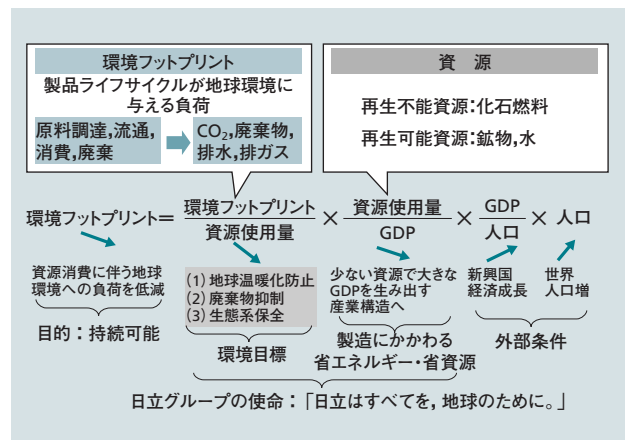
## 2 地球環境問題と資源制約

まず、筆者の理解する地球環境問題の緩和指針を図1に示す。同図の式は、地球の人口、GDP (Gross Domestic Product: 国内総生産)、資源使用量、環境フットプリント (環境への影響度) を恒等式で表している。

資源とは、後述する再生不能資源 (化石燃料などのように消費すれば元に戻らない資源) と、再生可能資源 (鉱物や水のように消費してもリサイクルが可能な資源) である。

また、環境フットプリントとは、原料調達から廃棄に至る製品のライフサイクルが環境に及ぼす影響である。

左辺の環境フットプリントを低減するためには、資源消費に伴う地球環境への負荷を低減しなければならない。しかし、右辺第4項の人口と、第3項のGDP/人口 (一人当たりのGDP) は今後の増加が見込まれる。したがって、右辺第2項の資源使用量/GDP (GDP当たりの資源消費量) と、



注: 略語説明 GDP (Gross Domestic Product)

### 図1 地球環境問題の緩和指針

地球環境問題を緩和するためには、省エネルギー・省資源とともに、地球温暖化防止、廃棄物抑制、生態系保全が必要である。

再生不能資源 (Non-renewable Resource)	化石燃料 (石油,石炭)	消費すれば炭素が CO <sub>2</sub> となって大気に拡散	低炭素社会
	ウラン燃料	CO <sub>2</sub> 発生なし	
再生可能資源 (Renewable Resource)	太陽, 風,波	常時利用できる資源 (エネルギー)	循環型社会
	水, 木(森林)	循環利用できる資源 (枯渇することもある。)	
	鉱物(金属)	地下資源は減るが 地上に残っている。	

**図2 再生不能資源と再生可能資源**  
低炭素社会と循環型社会をめざすには再生可能資源の活用が重要である。

第1項の環境フットプリント(資源使用量に伴う環境フットプリント)を減らさねばならない。第2項はより少ない資源で大きなGDPを生み出す産業構造への転換を意味する。すなわち、製造にかかわる省エネルギー・省資源の重要性を示している。第1項は(1)地球温暖化防止,(2)廃棄物抑制,(3)生態系保全が必要条件となる。これら(1)~(3)は、今後、製品が備えておくべき一種の「地球環境適合仕様」と言える。

そこで、第2項の製品の省エネルギー・省資源は言うまでもなく、第1項の(1)地球温暖化防止,(2)廃棄物抑制,(3)生態系保全を目標とすることを、日立グループは「環境ビジョン2025」に掲げている。

この中で、資源にかかわる問題は、化石燃料などの再生不能資源の消費を抑えること(低炭素社会)と、鉱物や水などの再生可能資源をリサイクルすること(循環型社会)である。この二つのアプローチと資源問題の関係を図2に示す。まず、資源を再生不能資源と再生可能資源に分類する。再生不能資源とは、石油、石炭、ウランが代表例であり、再生可能資源とは、太陽光、風力など、エネルギー獲得の密度は低いが恒常的に利用できる自然エネルギーや、水や森林など循環利用できる資源、ならびに金属などの鉱物資源である。

地球環境問題の本質は、再生不能資源が有限であるにもかかわらず、人口増加により、この再生不能資源を急速に消費していることである。地下に腑(ふ)存している石油や石炭を燃焼させれば二酸化炭素が発生し、温暖化を加速させる。鉱物資源をやみくもに採掘すれば鉱物価格が上昇し、これを原料に製造する製品やエネルギー生産機器の価格も上昇する。化石燃料にせよ鉱物資源にせよ、地下資源が枯渇すれば人類は持続できない。

資源が有限である中で、目標とする持続可能社会に近づく第一の手段は、再生不能資源である化石燃料を極力使わ

ず、太陽エネルギーや風力などの再生可能エネルギーにシフトしていく低炭素社会の実現である。第二の方法は、再生可能資源である水資源や金属資源を節約する循環型社会の実現である。

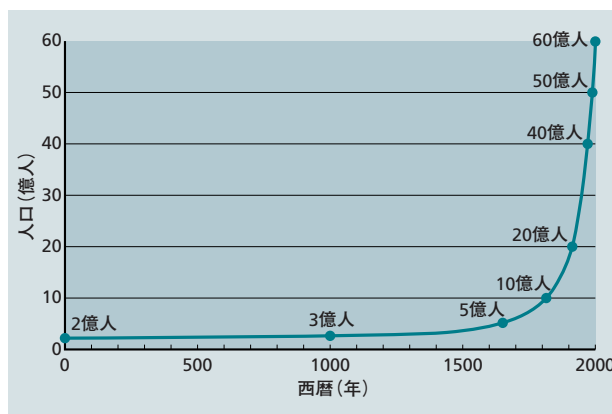
資源の循環という意味では、金属だけでなく、石油から作ったプラスチックもある。本稿では、これらの中で、金属資源やプラスチックなどを循環利用して循環型社会をめざすアプローチについて述べる。特に、電機・電子製品のリサイクルに焦点を当てる。

### 3 地上資源のリサイクル<sup>1)</sup>

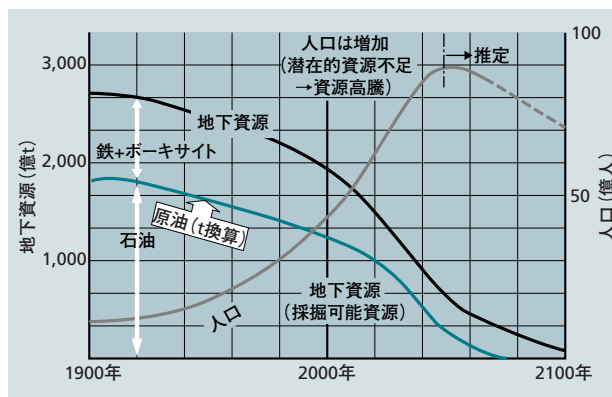
#### 3.1 人口と資源の推移

人口と資源に関して図3と図4を示す。西暦0年から産業革命のころまで、地球の人口はおおむね10億人以下だったが、地下からエネルギーを手にした人類の人口は、加速度的に増えてきた。

過去100年の経過と今後100年後までを見てみよう。図4は1900年から2100年までの地球の人口と資源量の推移の一例を示す<sup>2)</sup>。2008年ではすでに約65億人強の人間が地球上に暮らしている。図4には、石油、鉄、ボーキサイト(アルミニ



**図3 人口と資源の推移**  
産業革命後から人口は指数関数的に増加している。



**図4 人口の増加と資源の枯渇**  
人口が増加し、資源は急速に枯渇していく。需要(人口)が増加し、供給(資源)が減少すれば、あらゆる物価は上昇する。

ウムの原料)の地下埋蔵量の推移例を合わせて示した。新たな大規模油田が発見されないかぎり、21世紀中葉には、石油生産が減少に転ずることは避けられない。鉱物資源も同様で、新たな資源が幾ら発見されても、いつかは枯渇する。

図5には地下資源と地上資源の推移を示した。まず、地下資源量は20世紀中葉以来、急激な採掘によって減少し始め、これが21世紀の後半にかけて次第に枯渇していく。鉱物資源などの地下資源は、鉄、銅、アルミニウムなどに精製され、これらを原料として製品が作られるが、使用済みの製品は廃棄物となる。金属の多い廃棄物は、鉄系スクラップとしてリサイクルされるものもあるが、埋め立て処分されるものもある。また、リユースされる製品もある。このように、地上に出た資源は地球上から消えたわけではなく、地上のどこかにある。これらを「地上資源」と呼ぶことにする。地上資源と地下資源の総和は、図5の点線で示すように一定である。このように、地球上の金属量は一定であって減ったり増えたりしているわけではない。地球の物質収支は成り立っていて、存在場所が地下から地上へ移行しただけである。つまり、使用可能な資源は徐々に地上に移行していくのである。

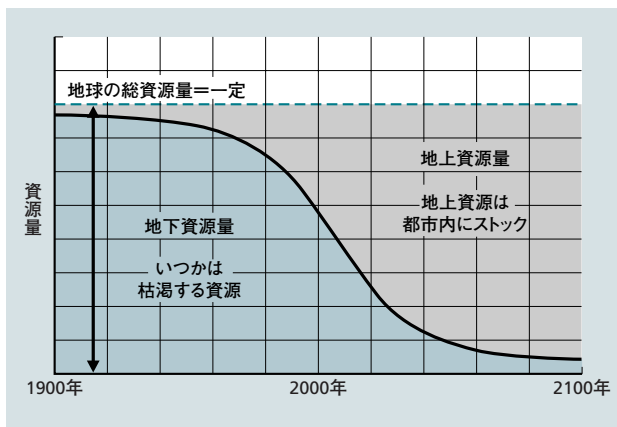


図5 地下資源と地上資源の推移  
地下資源と地上資源の総和は変わらない。地下から採掘した資源は地上に移行していく。

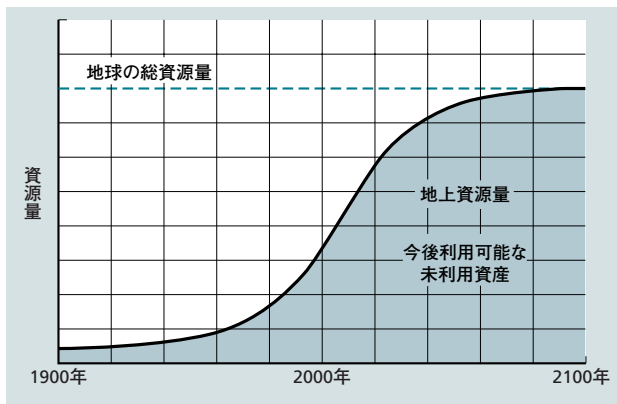


図6 地上資源の増加  
地上資源はむしろ増加していく。この地上資源を循環利用する社会システムが求められる。

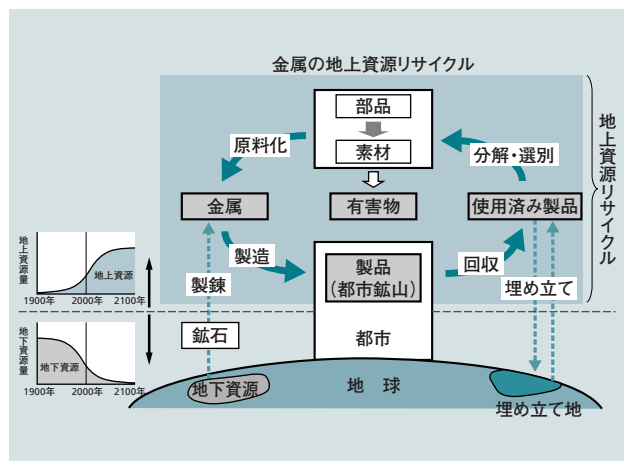


図7 地上資源リサイクルの概念  
地下資源を採掘せずに地上資源の循環利用によって、持続可能な社会に近づくことができる。

それを象徴的に表すために、図5の地上資源量のみを反転させたものが図6である。このように、地上資源は次第に増えていく。したがって、この地上資源を循環利用する社会システムを構築していくことが、持続可能社会には必要である。

### 3.2 地上資源リサイクルの概念

地上資源の中で、金属に着目した「地上資源リサイクル」の概念図を図7に示す。地下資源である鉱石を製錬して金属を生産し、この金属を原料として製品が製造される。製品は主に都市で使用された後、従来は、廃棄物やスクラップ(リサイクル)になってきた。

一方、家電リサイクルに代表される「資源循環型工場」では、使用済みの製品は回収され、分解・選別されて部品あるいは素材として選別・回収される。これらは金属の原料となり、再生金属としてリサイクルされる。この循環が地上資源のリサイクルである。

資源がプラスチックの場合には、図7の中で「地下資源」を「油田」に、「鉱石」を「石油」に、「金属」を「プラスチック」にそれぞれ置き換えると理解しやすい。これら、プラスチックと金属から作られるのが工業・電機・電子製品である。後述するレアメタルや希少金属も含有していることから、都市に眠る「都市鉱山」と呼ばれている。経済的に採掘可能な地下資源量は21世紀中葉に向けて急激に減少していくので、地上資源のリサイクルがますます重要になっていく。

### 3.3 省エネルギー・省資源効果

リサイクルは資源をむだに使わないという面が強調されている。しかし、その間接的な効果は地球温暖化抑制である。資源のリサイクルと地球温暖化とはすぐには結び付か

ないように感じられるが、地下資源を使わないで製品を作れば、エネルギーを節約でき、さらに製造工程での二酸化炭素排出量も大きく減らすことに貢献できる。

製錬過程では大量のエネルギーを消費し、かつ、製錬所の環境対策にもエネルギーを使う。まず、消費エネルギー面で見ると、鉄の場合には、地上資源から回収した鉄スクラップを電炉で溶かして生産するエネルギーは、原鉱石から生産するよりも3.5倍のエネルギーを節約できる<sup>3)</sup>。銅は約 $\frac{1}{7}$ で済み、アルミニウムは $\frac{1}{20}$ 以下である<sup>3)</sup>。つまり省エネルギー型である。また、省資源面では、鉄鉱石から粗鋼1tを生産するには鉄鉱石約1.5t、石炭約0.8t、石灰石約0.2tが使用されるが<sup>4)</sup>、これらの資源を使わない。このように、鉄スクラップの電炉受け入れは本質的に省エネルギー・省資源型の生産方式である。

また、地下資源を使わないことは環境破壊抑制にも効果がある。地下から採掘する場合は、多量の土砂や岩石を取り出し、廃棄物となる。管理が行き届かなければ環境も破壊しやすい。銅を例にとると、銅鉱石の中の銅含有率は約0.5%である。したがって、0.5万tの銅を生産するには100万tの銅鉱石を採掘し99.5万tの廃棄物が発生する。製錬過程での廃棄物は鉱山や製錬所近くで処分されることが多いが、これらを抑制できる効果がある。

もう一つの効果は埋め立て地の延命化である。都市の主に家庭で使用された電機・電子製品は、現在の自治体での処理方法では都市周辺の埋め立て地に処分されることが多い。これは、有限である埋め立て空間を消費している意味でも改善の余地がある。

### 3.4 家電リサイクルに見る実例

地上資源をリサイクルしている実例として、2001年4月から施行された「家電リサイクル法」がある。冷蔵庫、洗濯機、エアコン、テレビのリサイクルを義務づけた法律であり、施行以来毎年1,000万台以上がリサイクルされている。家電リサイクルの実際について説明する。図8は、日立グループが中核となって設立した家電リサイクル企業である東京エコリサイクル株式会社の基本プロセスである。

家電品をまず手分解で分解し、コンプレッサ、モータ、基板などの部品類と、フロンなどの有害物を回収する。筐(きょう)体を破砕機で破砕し、金属とプラスチックの混合片を得る。これを、鉄、銅・アルミニウム、プラスチック類、低比重ポリウレタン(冷蔵庫断熱材)に物理的に選別していく。並行して、回収した部品を精製して、図9に示すような素材も生産している。

東京エコリサイクルでは、2002年以來、処理量の約98%を資源に戻し、1.9%を焼却し、0.1%を埋め立てているとい

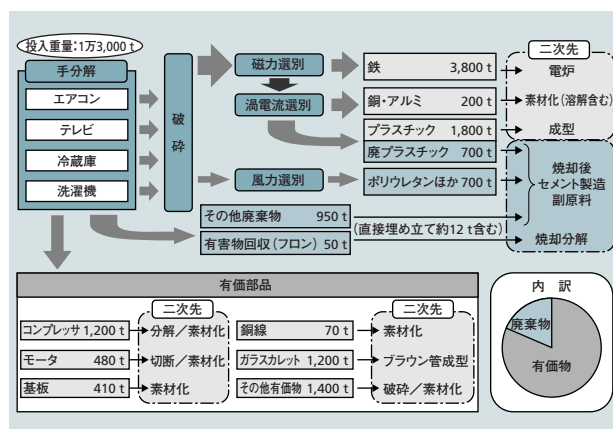
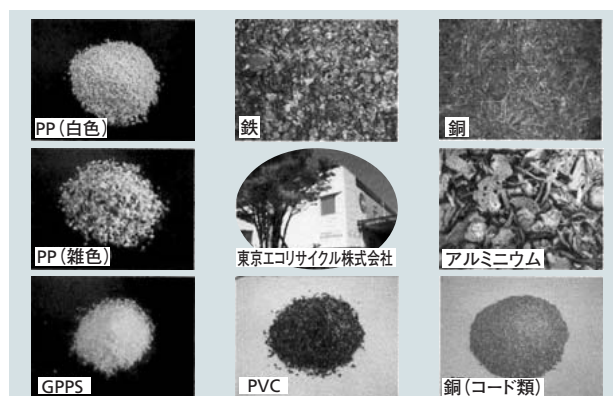


図8 家電リサイクルの基本プロセス

冷蔵庫、洗濯機、エアコン、テレビをリサイクルし、手分解と多段階から成る機械選別で部品と素材を生産する。



注：略語説明 PP(ポリプロピレン)、GPPS(一般ポリスチレン)、PVC(ポリ塩化ビニル)

図9 家電リサイクル工場での生産物の例

プラスチックを材質ごとに選別して均質な素材にし、金属類も純度の高い銅などを生産している。

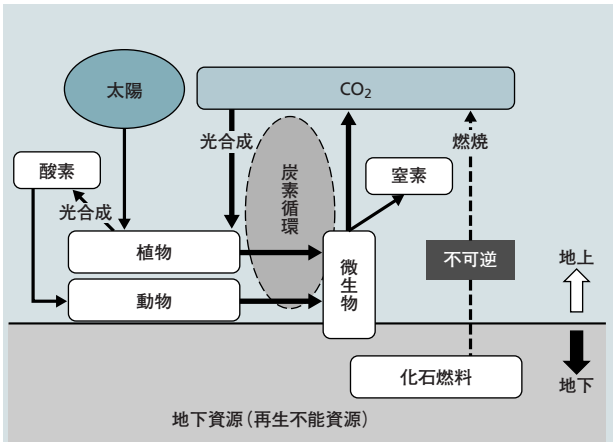
う実績があり<sup>5)</sup>、ゼロエミッションを継続している。金属やプラスチックを、地下から採掘しない効果をLCA(Life Cycle Assessment)という手法で試算したところ、1年間で約1万3,000tのリサイクルによる二酸化炭素削減効果は約1万2,000tであった。家電品に匹敵する二酸化炭素量を削減できたことになる。また、純度を高めた資源は、より高値で売却できることから経済性も改善した。

## 4 地球生態系に学ぶリサイクル

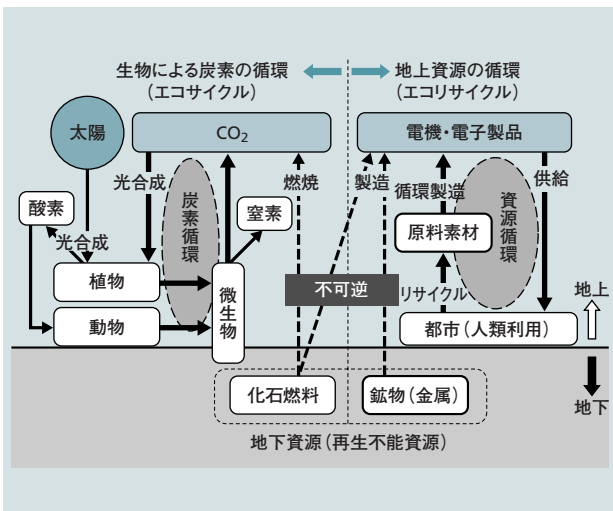
### 4.1 炭素の循環

二酸化炭素は化学的に安定であり利用先は限られるため、二酸化炭素を吸収・同化する植物の役割がより重要になる。対策としては植林などがあるが、現実には、それにも増して森林伐採が進んでいると言われている。

地球での炭素の循環を模式的に図10に示す。ただし、同図では前述した海洋との相互作用は省略した。大気中の二酸化炭素の総量は約7,090億tあり、化石燃料の燃焼で1年間に排出する炭素量は約70億t程度とされている<sup>6)</sup>。植物は太



**図10 地球生態系の炭素循環 (エコサイクル)**  
植物と微生物から成る炭素吸収源に対して、化石燃料の不可逆的な燃焼は地球の炭素循環に影響を及ぼしている。



**図11 エコリサイクルの概念**  
鉱物資源と化石燃料から製造した電機・電子製品を、都市スケールで資源循環することが持続可能な社会には必要である。

陽光と大気中の二酸化炭素を吸収して、光合成により炭水化物を合成している。同時に、地上では命の尽きた植物や動物を微生物群が分解して大気に二酸化炭素を排出している。これらの二酸化炭素移動量はともに500億tから600億tでバランスしている。

植物を増やせば大気から地上に固定する炭素量は増える。大気中の二酸化炭素濃度を下げる以外に、現状において選択できる方法は、人類活動による二酸化炭素排出量を減らすか、出るものについては発生源で回収して封じ込めることである。回収した二酸化炭素を地下に隔離・貯留することがEU (European Union) で真剣に検討されている。

微生物は土壌中にも存在していて、動植物の死骸(がい)のアンモニアなどをいったん酸化して硝酸イオンや亜硝酸イオンにする。次に、嫌気性微生物(酸素を嫌う微生物群)が脱窒(だっちつ)と呼ばれる還元作用で、亜硝酸イオンを還元して窒素を生産する。植物の生産する酸素と、微生物が生産する窒素とが地球の大気の源であり、大気中の窒素と

酸素濃度は平衡を保ってきた。この平衡サイクルは地球生態系として自律的に回るエコサイクルである。

しかし、数億年で蓄積された化石燃料の大半を3~4世紀程度で燃やしてしまえば、生成する二酸化炭素は、植物や海洋の吸収速度を超えて大気中に蓄積することになる。もし、すべての化石燃料を燃焼し尽くせば、大気中の二酸化炭素濃度は高い濃度で安定し、この結末が極限の地球温暖化になる。

地球の物質収支から見れば、いったん二酸化炭素になったものは、すぐには化石燃料にはならず、数億年以上をかけて植物に同化させ、石油や石炭に戻すしかないが、これは残念ながら、今の人類にはできない。

**4.2 電機・電子製品のリサイクル**

前章で述べた、地球の炭素循環(エコサイクル)のアナロジーで、金属資源を中心に21世紀以降は「地上」でこれらを循環してはどうかというのが本稿の主題である。

図11は左に生物による炭素循環(エコサイクル)を、右には金属を中心とする資源の循環をそれぞれ示す。これは地下から地上に移行した地上資源の循環である。

まず、地下の金属資源や化石燃料から電機・電子製品を製造し、これを都市に供給し、リサイクルにより原料素材を生産するのである。この電機・電子製品はレアメタルなどの高価値元素も含む貴重な地上資源である。しかも、地下資源より高密度であり、省エネルギー・省資源でリサイクル可能である。したがって、地下資源に依存することなく、金属とプラスチックでできた製品から資源を回収して地上で循環する。生態系の「エコサイクル」をモデルにして、このサイクルを「エコリサイクル」と呼ぶことにする。生態系の「エコサイクル」は自律的に動いているが、「エコリサイクル」は能動的に動かさなければ回らない。しかし、人間が行う以上、能動は可能であるから「エコリサイクル」の実現は可能であると考えられる。その一つのオプションは、地上資源の経済的循環を政策に反映させ、地上資源循環産業を育成することである。経済性が成り立たないリサイクルを成り立たせる方法については議論を重ね、社会的合意も必要である。

**4.3 エコロジーとエコノミーの両立**

このポイントは、地上資源の循環を「経済的に」成立させることである。エコロジーとエコノミーの両立である。そのためには、地球生態系と地球経済をバランスさせなければならない。この環境と経済との両立は相反する目標としてとらえられることが多いが、その実現は不可能ではない。

その方法について提言したい。モデルは家電リサイクルである。日本の家電リサイクルは、リサイクル料金(2,400～4,600円)を消費者が払うことが大きな成功要因になっている。受益者が経済的対価を払うことにより、持続可能な便益を得るのである。環境を守るために経済を駆動させる、つまり、リサイクル料金を支払う仕組みを定着させることによって、エコロジーとエコノミーとが両立する。

もう一つの例は下水道である。一般家庭の下水道料金(20 m<sup>3</sup>と仮定)は月に1,000～5,000円である。この費用によって排水を浄化し、放流して水質汚濁を防止している。それが持続可能社会の必要経費であることは皆が理解・納得し、下水道は社会インフラとして定着した。

20世紀型の廃棄物の処分費用は、主に「埋め立て」目的に使われていた。つまり、どちらかという「お墓」を作る費用であった。しかし、現在の家電リサイクルは、有害な物質を除去して適正に処理し、価値ある有限の資源は回収され、純度を上げて再び原材料に姿を変え、新たな命を吹き込まれて新しい製品に生まれ変わる。これが21世紀の社会インフラになるのではないだろうか。

## 5 レアメタルのリサイクル

ベースメタルである鉄は産業革命以来、地球の機械文明化を牽(けん)引してきた。電気製品が登場し、電気や熱を伝える金属として銅が使われ、軽量化を加速したのがアルミニウムである。金、銀、銅、鉛、亜鉛が工業製品に使われ、電子機器の時代になって、高度の機能を発現させる元素としてレアメタル(本稿では希少金属も含む)が重要な役割を果たすようになった。

携帯音楽プレーヤ、デジタルカメラ、携帯電話などには、金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、パラジウム(Pd)などが含まれている。ハイテク電子機器は金、銀、銅、レアメタルの宝庫である。リチウム(Li)やコバルト(Co)は燃料電池に採用され、白金(Pt)やパラジウム(Pd)は自動車などの排ガス浄化触媒として不可欠である。白金(Pt)とルテニウム(Ru)は磁気ディスクのターゲット材に使われる。インジウム(In)は液晶テレビやプラズマテレビの透明電極に、タングステン(W)は超硬工具、アンチモン(Sb)は難燃助剤にそれぞれ必要である。レアアースとして分類されるネオジウム(Nd)やディスプレイウム(Dy)は、ハードディスクなどの高精度・コンパクトモータに利用されるほか、特にハイブリッドカー用モータ製造に必須の元素である。このように、IT産業に加えて、地球の環境保全のための環境産業の発展にはレアメタル類が不可欠である。

ここで、鉄(Fe)、銅(Cu)、スズ(Sn)、鉛(Pb)、金(Au)、

**表1 金属の可採年数**

金属類の可採年数〔可採年数(年)＝埋蔵量(t)÷採掘速度(t/年)〕は100年未満のものが多く、可採年後に資源が枯渇するわけではないが、徐々に資源制約の時代になっていく。

ベースメタルと希少金属		レアメタル			
鉄(Fe)	94.6	インジウム(In)	5.8	ニッケル(Ni)	41.3
銅(Cu)	31.3	アンチモン(Sb)	13.0	モリブデン(Mo)	48.0
スズ(Sn)	22.3	カドミウム(Cd)	25.8	セレン(Se)	59.0
鉛(Pb)	19.9	タンタル(Ta)	33.3	コバルト(Co)	121.7
金(Au)	16.8	タングステン(W)	39.0	テルル(Te)	164.0
銀(Ag)	13.8	マンガン(Mn)	40.0	リチウム(Li)	194.3

注：金、銀は希少金属  
出典：DOWAエコシステム株式会社(埋蔵量を消費量で割った数値)

銀(Ag)の可採年数と、主要レアメタルの可採年数とを表1に示す。鉄は約100年、銅、スズ、鉛は約30年以下である。金と銀は20年以下である。レアメタルの可採年数は総じて数十年未満で、インジウムは10年を切っている。可採年数は、実際には鉱脈・鉱床の発見や採掘の着手により変化し、同時に消費速度によっても変化する。したがって、可採年数後に資源がなくなるわけではない。しかし、中長期的には地下資源は枯渇していき、価格は必ず上昇する。

このように見てくると、地上資源のリサイクルは、単に地下資源の枯渇を防ぐというだけでなく、文明の発展に不可欠なレアメタル材料を地上で調達するという側面を持つことがわかる。レアメタルを使う高機能製品は、利便性を増すという面に加えて、結局、省エネルギーや省資源にも役立つ場合が多い。それゆえ、地上資源リサイクルは、持続可能社会のために不可欠な社会インフラに位置づけられる。

## 6 おわりに

ここでは、地球の資源が枯渇していく中で、生産された製品をリサイクルすることの重要性について述べた。

現在、実施されている家電リサイクルにもフラットテレビなどの品目が追加される。このように法律が整備されていくのに伴って、リサイクルにさらに積極的に取り組むたい。製造業に限られた資源を循環する時代が近づいている。

### 参考文献

- 1) 馬場：地上資源が地球を救う、技報堂出版(2008.6)
- 2) 根本、外：CO<sub>2</sub>削減・循環型社会の実現をめざすリサイクル技術、日立評論、90、5、434～437(2008.5)
- 3) マイヤーズ、外：65億人の地球環境、産調出版、p.118～119(2006.9)
- 4) 環境省編：平成19年版環境循環型社会白書、p.92(2007.6)
- 5) 馬場：家電リサイクル分野でのゼロエミッション達成、電気学会 誘電・絶縁材料研究会(論文番号：S-57-3)(2004.3)
- 6) 広瀬：地球環境の物理学、ナツメ社(2007)