



金属のサプライチェーンにおける 資源循環のボトルネック

A Bottleneck of Resource Circulation in Supply Chain of Metals

中村 崇
Takashi Nakamura
東京大学 生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門
特任教授

1 はじめに

最近のキーワードに(持続可能な発展に関する目標、SDGs)がある¹⁾。すべてがSDGsに対して動かないといけないという雰囲気があり、本来地球環境を考えてきた方々には、多少しらせる思いがあるかもしれない。17の大きな目標設定がなされ、我々の生活行為そのものがどこかに含まれる。資源循環を考えると以前持続可能な生産と消費と言われ、現在日本語で「作る責任使う責任」と表現される目標12になる。図1にその内容の詳細を示す。製造ならびに消費の両方をほぼ同じ重要性和位置づけ、エコロジカルフットプリントの表現を使用し、環境影響を評価しようとしている。ここで言う資源は、当然国連で定義しているように鉱物資源だけでなく、土地、水、食料など幅広く考えており、特に水に関

しては、特出ししている。もちろん資源循環は目標13の気候変動のところに大きな影響を及ぼすと考えられている。一次資源の浪費の裏にはエネルギーの多大なる消費があり、かつそれは直接的に温暖化の影響による気候変動につながるからである。本総説は金属資源、主にレアメタルを対象にするが、現実的にはそれが実質的にベースメタルと共に考えるべきであることを再確認するのが目的である。特に金属資源循環のボトルネックをサプライチェーン全体の中で捉え、どこがボトルネックになっているかを簡単に解説する。

2 金属素材

素材製造産業は、我が国のGDPに及ぼす影響が小さい割にはエネルギー消費が大きく、また古くから公害問題を引き

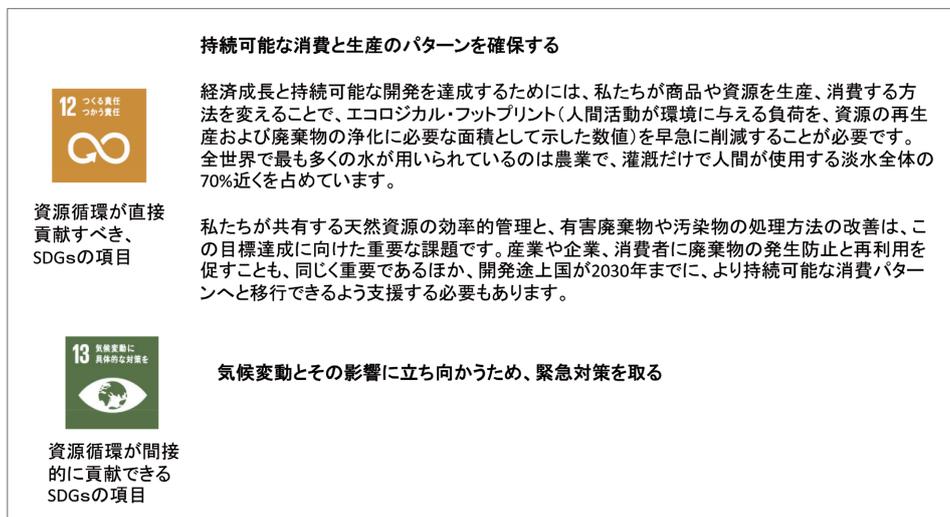


図1 資源循環が貢献すべき、SDGsの項目

起こした経緯もあり、一般には環境負荷が大きい産業と思われる。実際、単純に売り上げ額あたりのCO₂発生量は大きい。しかしながら、セメント、高分子、鉄鋼、非鉄等の素材は、産業を支えるためになくてはならないものであり、高品質の素材を安定に供給できることが高度な産業社会を形成する必要な要素の一つである。その点で、我が国はこれらの素材産業が世界的な競争力を持ちながら存在するところに特徴があり、この産業全体のバランスが取れている点が大きな強みになっている。

鉄鋼業に限れば、究極の環境貢献は、「最小の環境負荷で最大のパフォーマンスを持つ鉄鋼材料を供給すること」である。その意味で我が国には、世界でもっとも環境貢献をおこなっている鉄鋼業が存在しているといえる。さらに他の素材産業同様に鉄鋼業の環境貢献は、鉄鋼材料供給の枠を超え、循環型社会の構築に寄与している。特に廃プラスチック資源の化学原料としての有効利用での貢献は大きい。莫大な原料とエネルギーを効率よく使用するシステムとプロセスを持つ鉄鋼業はこれからもさらに環境事業を展開できるポテンシャルを持つものと思われる。

一方“レアメタル”という言葉が市民権を得て、あまりこれまで金属材料に関わらなかった一般の人にまで浸透している。ただ、レアメタルの定義は広範で都合が良い分、人によってはあいまいであり、具体的な対策を検討する場合には優先順位などを明確に認識しにくい場合がある。レアメタルの捉え方は立場に寄って大きく変わる。資源エネルギー庁で所管の総合資源エネルギー調査会鉱業分科会レアメタル部会では、以前備蓄を行っていた7鉱種と追加2鉱種(Ni, Cr, Co, Mn, W, Mo, V + In, Ga)にPt, REなどを加えて31鉱種をレアメタルとしている。ただ、従来からの備蓄7鉱種は、鉄鋼の添加元素としての必要量が大きく、一般のレアメタルのイメージとは異なる。多くの人々のレアメタルに対するイメージは、元素としての発見が新しくかつ資源量が少なく、そのためにコストが高く生産量が少ないということであろう。後ほど詳細に示すが、一般に使用例としては磁石に使用される希土類金属(Nd, Dy)などがすぐにイメージされる。なお、この31鉱種の指定は、我が国独自の対応であり、学術的にはほとんど意味を持っていない。EUでは主にMinor Metalsと言う言い方が普通であった。日本が火をつけた感があるこの分野では、Critical Metals²⁾, Critical Materials³⁾などの言い方で欧米でも注目を集めている。元々米国は資源セキュリティには厳しい国であり、我が国より古くCritical Minerals⁴⁾の提案を行っていた。いずれによせ欧米では資源セキュリティの感覚が強い。その点を見落としては、レアメタルの代替材料開発、リサイクルも最終目的を失うことになる。特にレアメタルを使用した機能性材料、その材料を使用した高度

な工業製品の生産は国の基幹産業になる場合が多く、産業的には重要な意味を持つ。

例として挙げれば、希土類元素のNdとDyは現在実用レベルでもっとも強力な永久磁石であるNd-Fe-B系磁石の原材料であり、そのほぼ100%を中国からの輸入に依存している。その後、国内でNd-Fe-B系磁石が製造され、省エネ家電製品やハイブリッド車にモーターとして使用されている。地球環境問題を考えるとこれからも大きく需要が伸びる製品と予想され、産業上非常に重要な位置づけとなる。要は、クリティカルメタルそのものの産業としての規模は大きくないが、それが係わる製品の裾野が広く、どちらかというわが国の基幹産業の製品に使用され、その結果わが国の産業構造上欠かすことができない原材料といえる。特にレアメタルは産業のビタミンとも称せられるが、供給が止まると製造業を中心とした健全な産業活動が麻痺する可能性が高い。

ここで、再確認をしておきたいが、レアメタルは必ずしも資源量が少ないわけではない、表1に地殻中の元素の存在割合を示す⁵⁾。もちろん、正確な値ではないが、概ね順位は変わらないと言える。この表から見るとCe, Y, La, Ndなどの軽希土類元素は、従来からベースメタルと呼ばれている銅、亜鉛とほぼ同じレベルであり、鉛より大きな値を持っている。この事実から見てもレアメタルは必ずしも本質的な資源量と結びついてないことがわかる。それでは、一体どんな金属がレアメタルなのであろうか？それは、主に下記のようにグループ分けできる。

- ①本質的に資源量が希少である 白金族類金属等
- ②実用素材の製造が困難で供給が少ない Ti, Ta, Nb等の高融点金属等
- ③自然による濃縮作用がなく、専用の鉱石がほとんど存在せず、副産物で産出される In, Ga, Sc等
- ④実用材料での使用量が少なく、絶対量が必要でない金属等 Se, Te, Bi
- ⑤特定の国で産出もしくは、生産されており、そのため供給リスクの可能性が高い金属等 希土類元素, W, Sb

この中である意味やっかいなのが、⑤であり、本当に重要なのは①と考えられる。このような分類を考えると我が国でレアメタル指定はされていないが、金、銀の貴金属やSnなどもレアメタルに入れてもおかしくない。これらの金属は、貴金属を除くと市場規模が小さいので世界経済の中で投機の対象となりやすく、その素材、材料が持つ本質的な価値よりも価格が大きく外れるところにある。したがって、使用する側においては、大変リスクの高い原材料となり、実際に使いにくい素材となる。このイメージがあるために需給に関する対

表1 地殻中の金属元素の存在度

地殻中の金属元素の存在度				地殻中の金属元素の存在度			
元素名	地殻存在度(ppm)			元素名	地殻存在度(ppm)		
けい素	227,200			ベリリウム	2.0	~	2.8
アルミニウム	80,000	~	81,350	エルビウム	2.8		
鉄	50,000	~	58,000	タンタル	2.0		
カルシウム	36,300			砒素	1.8	~	2.0
ナトリウム	28,300			錫	1.5	~	2.0
マグネシウム	20,900	~	27,700	ウラン	1.6	~	1.8
カリウム	16,800	~	25,900	ゲルマニウム	1.5		
チタン	4,400	~	8,600	モリブデン	1.2	~	1.5
マンガン	950	~	1,000	タングステン	1.0	~	1.5
バリウム	425			ホリミウム	1.2		
ストロンチウム	375			ユーロビウム	1.2		
バナジウム	135	~	170	テルビウム	0.8		
ジルコニウム	82	~	165	ルテシウム	0.5		
クロム	96	~	100	タリウム	0.5		
ルビジウム	90			ツリウム	0.5		
ニッケル	72	~	75	ビスマス	0.2		
亜鉛	70			カドミウム	0.2		
セリウム	60			アンチモン	0.1		
銅	55	~	58	インジウム	0.1		
イットリウム	33			銀	0.07	~	0.08
ランタン	30			水銀	0.02	~	0.08
ネオジウム	28			パラジウム	0.01		
コバルト	25	~	28	テルル	0.01		
スカンジウム	22			ルテニウム	0.01		
リチウム	20			白金	0.005	~	0.01
ニオブ	20			ロジウム	0.005		
ガリウム	15			金	0.002	~	0.004
鉛	10	~	13	レニウム	0.001		
ほう素	7	~	10	イリジウム	0.001		
ブラセオジウム	8.2			オスミウム	0.001		
トリウム	7.2			ポロニウム	存在		
サマリウム	6.0			アスタチン	存在		
ガドリニウム	5.4			フランシウム	存在		
ジスプロシウム	4.8			ラジウム	存在		
セシウム	3.0			アクチニウム	存在		
ハフニウム	3.0			プロトアクチニウム	存在		
イッテルビウム	3.0						

応策も間違いが起りやすい。

一時期のレアメタルに関する加熱ぶりと最近の無関心ぶりは、いつも同じように繰り返される「あるターゲットに集中し、時間がたつとすぐに忘れてしまう日本人の特性」が現れている。この点については多少の不快感と将来に対する心配が募る。個人的であるが、海外のクリティカルメタルも含め2030年あたりでのマイナーメタル材料の需給状況を予想した結果を表2に示す。多くの意見があるのは承知しているが、これは個人の予想結果である。これまでNEDO内におけ

るレアメタル動向調査の検討委員会委員長を10年に渡って務めてきた経験だけで予想したものであり、学術的な裏付けはまったくない。このような技術と経済状態ならびに地理的条件、政治状況までかかわる問題を客観的な学術的内容で予想できるとする方がおかしいと思うのが普通で良心的である。それでも警鐘を鳴らすことは意味があるので、示している。やはり気になるのは、Liである。図2に2014年にNEDOで作成された需給予想を示す⁶⁾。今ほど電気自動車シフトが起こっていなかった当時でもLiはかなり需要が製造を上回

ると予想された。当時は、ちょうど世界的に注目されたポリビアのウユニ塩湖のLi開発がほぼ中止された時期である。つまりまだこのような開発は先であると判断されたばかりであったが、それでも電気自動車の需要を満たすためにはかなりの資源開発が必要となる予想であった。現在は、再度活発な開発計画がなされているが⁷⁾、それよりも自動車用次世代電池が本当にどのようなものになるのかが判断できない今、これを予想するのは不可能であり、意味がない。ただ、現在製造させている約1億台⁸⁾の半分が電気自動車になり、かつそれらがLi主体の電池とすれば当然であるが、Liの供給ができないことは簡単に予想される。さらにそれに合わせて負極剤の天然グラファイトも供給できず、したがって、これらはまさにこれからの開発任せである。その意味で、電池素材の

循環使用はまさに世界規模の大課題であることがわかる。

3 金属資源循環と廃棄物処理

始めに基礎情報として金属の世界市場規模を生産量と価格で概観する。図3は2015年の金属価格の生産量と価格を対数でプロット表示したものである。ただし、金属価格の幅が広いので、多少考慮して価格は幅を広げてある。大きな傾向をつかむのが目的なので、これで問題ないと考えている。当然、負の傾きを持つ。直線近似できそうであるが、金と白金元素 (PGM) の動きが異なる。特に金はPGMより価格も高く、生産量も大きい。これを掛け算したものが概略市場規模として見ていいかと思うが、その順位は、鉄、金=銅、アルミニウムになる。金を除くとベースメタルである。そのほかの金属でも市場規模が大きいのは、亜鉛や鉛となり、レアメタルは小さい。市場規模が小さいと言うことは資源循環が難しいことを意味する。これが、つまりスクラップ価格は高くないが、絶対量が多い金属かもしれないが、大変価格が高い金属がリサイクルの対象となる。この基本を押さえて、下記の廃棄物処理との関係を理解する必要がある。

我が国のサプライチェーンでの資源循環を考えるにはどうしてもこの資源循環と廃棄物処理を考える必要がある。本来リサイクルと廃棄物処理は別である。本来のリサイクルは社会システムのサポートがなくても行われるべきものであろう。ところが、対象となるスクラップや副産物、もしくは廃棄物の収集が困難で天然資源を原料とした従来の生産システ

表2 希少原料物質の需給バランス予測 (2030年)

供給不足リスクあり Risk of deficit	需給がバランスする Balanced market	供給過剰 Surplus
天然グラファイト Li 重希土元素	Be* Mg(メタル) Nb Ta Cr, Ni Co F(蛍石) Ge W PGMs Si(Metal) P(リン酸塩)	B(ホウ酸塩) 軽希土元素

リチウム需要予測(次世代自動車市場予測より)

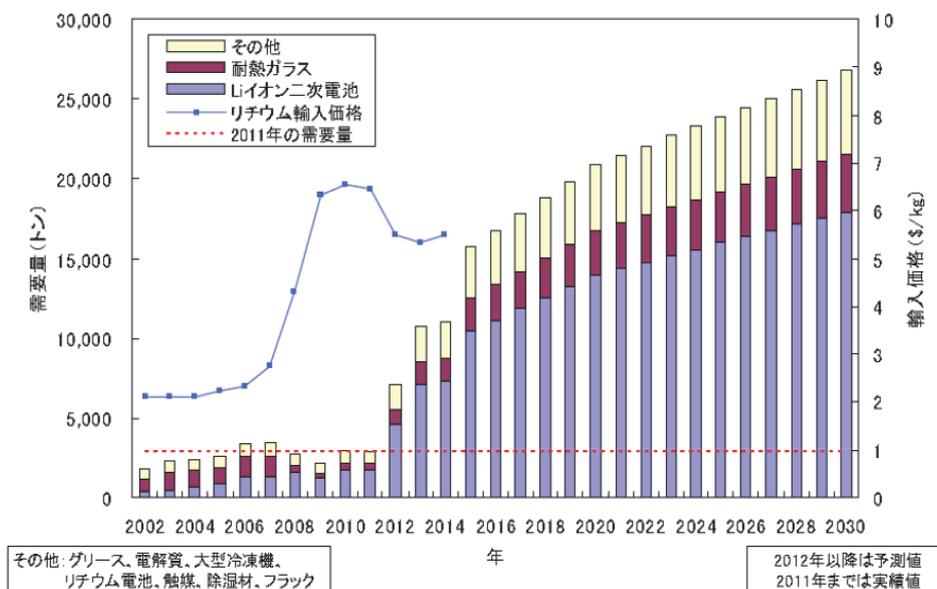


図2 Liの需給の現状と将来予想

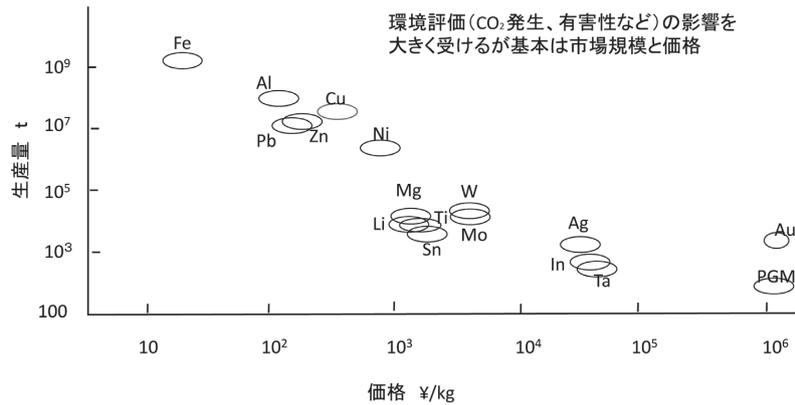


図3 金属の生産量と価格の関係

表3 リサイクルと廃棄物処理の違い

促進させる原動力	リサイクル 利益(経済合理性)	廃棄物処理 公衆衛生管理、環境 規制
目標	リサイクル率にはおのずから限界が存在(経済合理性の範囲)	法律で定める環境規制値
実行主体	民間、市民	自治体(税金)、市民

ムに対抗するにはそれほど容易ではない。一方、国民の環境意識の高まりから廃棄物処理を適正に行うことが強く求められている。特に、旧来は処分として廃棄物処分場へ埋め立て処理を行うことで十分であったが、廃棄物処分場の逼迫、また不法投棄、廃棄物処理業者の計画倒産などが大きな社会問題として目立つようになり、従来なら処分されていた廃棄物をリサイクルしようとする意識が高まってきた。その結果、リサイクルと廃棄物処理が同時に考えられるようになっていく。このこと事態はまったく問題がないが、基本として同じでないことを認識していないと社会システム構築ならびにそのシステムに応じた技術開発に失敗する恐れがある。そこでその違いを明確にする。

表3にリサイクルと廃棄物処理の違いを示す⁹⁾。議論をはっきりさせるために多少極端な表現をとっている。リサイクルは本来経済合理性の上に行うべきものである。日本においては、人件費が高いために収集コストやプロセスコストが高くなり、その結果世界経済の中では経済合理性を失うものが増えつつある。経済合理性の中で行う行為であるから当然リサイクル率には限界がある。経済合理性の上からもまた真の環境負荷の意味からもリサイクル率だけを問題にすることは、本来おかしいと思わなくてはならない。一方、廃棄物処理は、公衆衛生学を基に検討されつづけた歴史から税金を使用してもしなくてはならないものとの意識が強く、経済合理性では動かない。またこの部分の経済合理性を言い過ぎると

* 天然鉱山

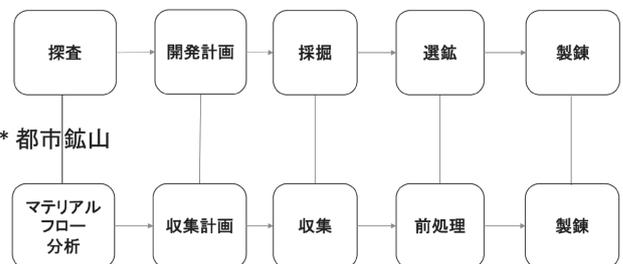


図4 天然鉱山開発と都市鉱山開発の比較

適正な処分が不可能になり、目的を失う。ここで強調したいのは、このように両者は異なった概念であったことである。

現実には、容器包装リサイクル法の下で行われている廃プラスチックリサイクルのように資源的に見て経済合理性がないものを、ボランティアと税金で収集し、処理費を払ってリサイクルしている。このことはリサイクルと廃棄物処理が現実解として同時に行われていることを示す。この個別リサイクル法は、主に経済合理性を持たせることができない廃棄物を処理するために行われた。これは、これで大変効果的であり、おかげで逼迫感が非常に強かった廃棄物処分場に若干の余裕が見られるようになっている。

4 資源循環のシステムと技術

図4に資源循環の基礎となる金属資源に関して、都市鉱山開発(リサイクル)と従来の資源開発の流れを示す。従来の金属資源開発は、探査→開発計画(FS)→採掘→選鉱→製錬の工程を経て行われる。一方都市鉱山は探査に対応するのがマテリアルフローの調査になる。どこに資源があるかまたどこから回収するのが妥当かをこの段階で明らかにする。次に回収の社会システムを検討し、どこからどのようなシステムで

回収するのが効率的かを検討する。まさに鉱山開発のFSに対応する。この部分は採掘に対応する。その後は廃製品からの有用金属の回収であるが、そのためにはまず効率的な前処理で目的金属の濃縮が重要である。最後の製錬は、多くの場合同じ技術であり、設備も併用できる可能性が高い。都市鉱山の場合もっとも重要で難しいのは回収の社会システムの構築である。我が国の場合、廃棄物の法制度が、特殊で一般廃棄物、産業廃棄物、また個別リサイクル法分かれており、それぞれの法律の中で回収を行う。図5に現状の産廃、各種リサイクル法をベースとした鉄、アルミニウム・電子スクラップリサイクルの流れを示す。個の廃製品の流れとその際に生じる法的な物流の制限を間違えると後段の技術でいくら頑張っても経済性が取れないことがある。特に最近は本来経済性がよくない廃棄物系の回収物から資源回収を検討することが多く、この傾向が強い。資源循環のボトルネックはこの収集システムの非効率さにある。もちろんそれぞれの法律はそれなりの事情があって、設置され運用されており、その時々では大変効果的であった。ただ、最後の金属資源、特にレアメタルなどの回収では、それぞれの中間処理で排出される中間物の回収が進みにくく、取扱量が少なくなり、資源化できないことの原因の一つになっている。

図5の中、製造工程で発生する工程内スクラップを使用するのが最も効率的なリサイクルであり、工程内スクラップはほぼ100%回収されている。一方市場からの回収は、多くの場合廃製品解体との結びつきが強く、廃棄物処理になりがちである。自動車解体の場合、一度に発生する量は他の産業機器と比べて必ずしも多くないが、確実に一定期間で排出されるので、業として成り立ち易い。自動車解体からは、鉄ならびにアルミニウムも同時に回収され、両方を取り扱うことが一般

的であり、最近では価格上昇により銅なども回収されている。

現在話題になっているのが、各種廃電子機器から発生するレアメタルを含有する基板である。基板の収集は、産業廃棄物系の電子機器が中心であるが、現在は家電リサイクル法で回収する基板ならびにこれまであまり手が付けられていなかった個人使用の小型電子機器からの回収もスタートした¹⁰⁾。最も有名なのが携帯電話であり、本来モバイルネットワークの名称で情報通信業者が中心とした回収システムがある。ただ、それを通して十分な回収率が得られていないのが現状である。他にPCについても公式なリサイクルルートが存在するが、これも回収率については十分でない。注意が必要なのは、電子基板の回収・リサイクルは含有する貴金属の価格、特に金に支えられている。したがって、基板には多数かつ微量のレアメタルが含有されているが、決してレアメタルをターゲットにしてリサイクルの経済合理性が成立しているわけではない。

その点を意識して我々は現状の経済環境で資源化が困難な副生物、廃棄物を資源化のためには、一時期保管 (Reserve) し、蓄積を行い、将来の原料 (Stock) とすることを提案している¹¹⁾。我々は、そのような保管・管理を行うことを“人工鉱床を作ること”と考えており、具体的に人工鉱床は、ある種の中間処理物の資源化目的の管理場所といえる。特にこの考えは、現在議論されているレアメタルリサイクルでは決定的に重要である。レアメタルリサイクルに限れば、本来資源として欲しいのはレアメタルであるが、実際に回収されてくるのは各種の廃製品である。廃製品はレアメタルだけで構成されているものは全くなく、逆にその存在量は廃製品中にわずかな量であることが多い。したがって、レアメタルだけを取り上げてリサイクルのシステムを作っても経済合理性を持

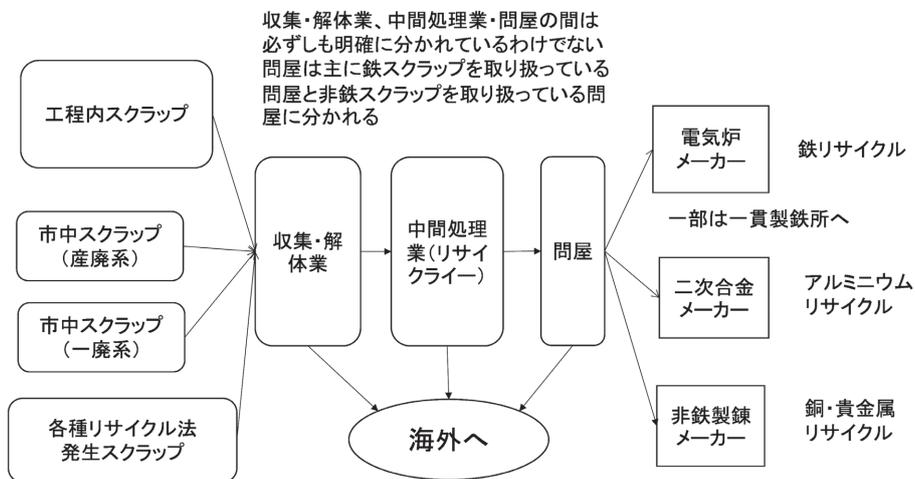


図5 産廃・各種リサイクル法をベースにした鉄・アルミ・電子スクラップリサイクルの流れ

つことはない。

重要であるから再度述べるが、鉄のリサイクルは、我が国において循環経済を考える際にもっとも重要なテーマである。アルミニウムとならんで、リサイクルの歴史が長く、前述したようにリサイクルのシステムが古くから動いている。多くの場合、我が国の産業廃棄物系の中間処理・リサイクルを担ってきた素材である。したがって、鉄・アルミニウムのリサイクラーは多くの廃製品のリサイクルを行っており、その取扱い素材にはプラスチックも含まれることが多い。両素材に共通しているのは、廃製品（主に自動車、電気製品、産業機械など）をシュレッダーなどで破碎し、それから固体選別を行うことである。多くの場合、始めに磁力選別で鉄を分離し、その後比重選別で、プラスチック、アルミニウム、その他の非鉄金属（ただしこの部分には磁選できないステンレススチールが含まれる）に分離する。その後、渦電流選別機を使用してさらにプラスチックの一部、アルミニウム、その他の非鉄金属を分離する、その後も種々の技術を利用してできる限りの分離を試みるが、通常、鉄、アルミニウム、その他のミックスメタルに分離され、それぞれの専門のリサイクラーに受け渡される。つまり鉄、アルミニウムのリサイクルが進まない他の素材のリサイクルも進まないことになる。

アルミニウムは鉄鋼材料より再溶解での精製が困難なので、よりスクラップの事前選別が重要となる。現在の流れは、スクラップアルミニウムは不純物の含有量制限が甘い、鋳物用として使用されることが一般的である。現在我が国を初め、世界的なレベルで自動車エンジンがアルミニウム鋳物で製造されていることが多い。したがって、スクラップアルミニウムのほとんどが2次合金として鋳物に使用されている。将来電気自動車や燃料電池車などが主体になると現在の2次合金のカスケード利用の流れが大きく変わることになる。それを見越してリサイクラーや素材メーカーの一部では新たな固体選別装置の導入が試みられている¹²⁾。ただ、このような高度なリサイクルを促進するためには単に選別技術の高度化のみならず、高度選別された優良なスクラップを高度な2次原料とみなすシステムの確立が必要になる。

銅のリサイクルの主体は再溶解である。特に電線屑は基本的に電気銅なので、そのまま再溶解のみで十分使用できる。再溶解以外の方法としては、銅製錬所に送る山元還元がある。銅の場合は、かなり低い銅含有量廃棄物である廃電子基板もいい2次原料になっており、製錬所の原料になれば電気銅として再生されるのが、鉄やアルミニウムと異なる。ただし、この電子基板の評価は主に金である。銅は日本に製錬所が残る限り、リサイクルでの課題が少ない。

資源循環の技術的なボトルネックがないわけではない。現

在多くの製品でマルチマテリアル化が進みつつある。そうなればなるほど解体だけでなく、破壊、破碎技術が重要になる。現状のプロセスでは、この部分はシュレッダーが担っているが、新たな動作原理を有する新技術の開発が望まれる。例えば、粉碎一つとっても「物質を壊す」科学のあり方は大変難しい。セラミックスや高分子、金属などの対象について粉碎の科学的な理解は及んでいない。それぞれのマクロ、ミクロ、ナノの組織ならびに化学結合そのものの破壊が加わり、現象としては粉碎という形で理解されているが、自由に粉碎を制御できる理論を我々は持ち合わせていない。経験的な手法は多く存在し、粉碎エネルギー量も推定できるが、粉碎の本質的理解はできていない。固体選別では、部品同士の分離、部品の破壊、内部の素子の破壊などいろいろな状況での破壊が存在し、それを自由に制御することが技術的に重要である。くどいようであるがそのための明確な理論は存在せず、かつそのようなことを研究する人も非常に少なく、分野的にはほぼ消滅している。考えている現象があまりの複雑系であり、簡単なモデルはともかく本格的な破壊のシミュレーションなどを科学的に解明することは行われていない。

5 まとめ

資源循環の最大のボトルネックは、回収システムにあることを述べた。もちろん、技術課題も多いが、それはシステムができればそれに適したいい技術開発ができる。社会システムの構築は資源循環の戦略であり、それを実行に移すのは戦術である技術である。この構図は変わらない。最近、動静脈一体で全体のサプライチェーンを考慮した回収システムの確立を模索する動きが出ている。当然のことである。イメージを図6に示す。図に書くと非常に当たり前のことになるが、それぞれのところで大きな壁があり、情報が途切れるために全体の流れがスムーズに行くことは少ない。これを意識してEUでは循環経済（Circular Economy, CE）が提唱されている¹³⁾。このコンセプトは別に資源循環を考えているのだけではなく、産業の在り方そのものを、高度な情報技術を基に変えてしまうことを目的としている。

廃製品を資源循環する場合でもできるだけ製品の情報を収集し、その情報をベースとした解体をできるだけロボットで自動化することを検討しているが、それよりも製品リユースや部品のリユース、再生をIoTで制御する方向に進んでいる。また、解体の結果として生じる2次原料の情報制御もIoT技術として大きなインパクトが予想される。このような分野に正面切って情報技術を導入するということがこれから期待される。

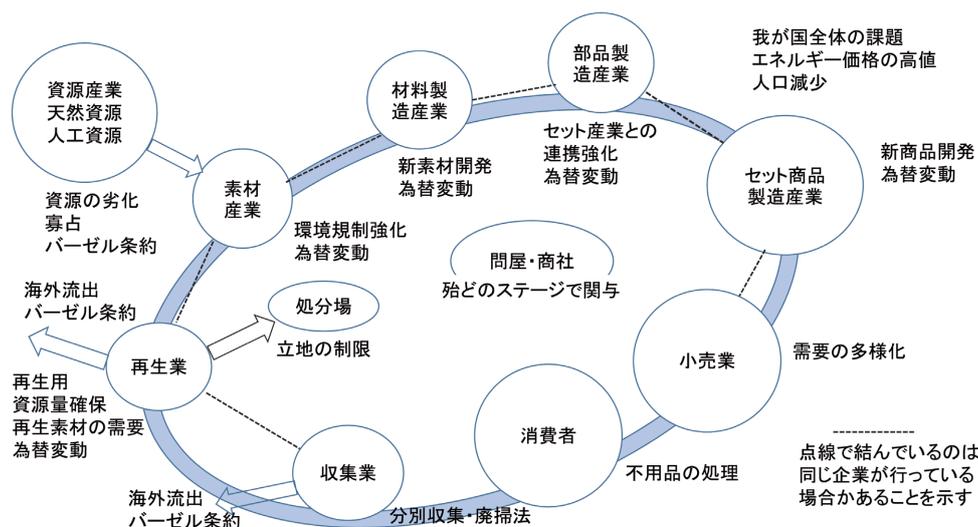


図6 動静脈一体型産業構造の構築に関する課題整理

参考文献

- 1) <http://www.jp.undp.org/content/tokyo/ja/home/sdg.html>
- 2) <http://www.energy.gov/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>
Critical Materials Strategy Summary, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2010
- 3) <http://www.energy.gov/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>
- 4) Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy : Committee on Critical Mineral Impacts of the US Economy, Committee on Earth Resources, National Research Council, the National Academies Press, (2007)
- 5) K.H. Wedepohl : Geochim.Cosmochim. Acta, 59 (1995), 1217.
- 6) NEDO レポート : 解説レアメタル 日刊工業新聞社 出版局, (2016)
- 7) http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/old_uploads/reports/resources-report/2013-01/MRv42n5-03.pdf
- 8) http://www.jama.or.jp/world/world/world_t2.html
- 9) 中村崇 : 資源・素材2004, 企画発表・一般発表 (C) (D) 資料, C-3-4 (2004), 54.
- 10) 環境省 : <http://www.env.go.jp/recycle/recycling/raremetals/law.html>
- 11) 白鳥寿一, 中村崇 : 資源と素材, 122 (2006), 325.
- 12) S.Owada, T.Hatano, R.Togawa, K.Wagatsuma, S.Kashiwakura, and T.Nakamura : Sensor Based Sorting & Control 2016, Aachen, (2016), 83.
- 13) http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm

(2018年3月5日受付)