

持続可能リサイクル設計

Recyclable Design for Sustainable Development

長 井 寿*

Kotobu Nagai

1. リサイクルと持続可能リサイクル設計

資源・エネルギーを節約し有効に使うためには、物質・材料のリサイクルが重要な役割を果たすの言うまでもない。しかし、使い終わったものをなんでも再生する意味でのリサイクルは、実は技術的には受け身の指向であり、とんでもない落とし穴も持っている。

再生業には「ものを大事にする」崇高な目的がある。しかし、市場経済のもとでは経営、経済活動の安定性が不可欠である。したがって実際の再生現場においても決して単純な「善意」のもとに、すべからくりサイクルが行われるわけではない。まず、いかに「善意」が無力であり、「善意」を無力にしている根本の原因が、現行技術の出発点に潜んでいることを、自動車における金属資源再生を例にとりて説明してみよう¹⁾。

1.1 廃車スクラップ処理にみるリサイクル

廃棄された自動車の余生はどうなっているか。一般的な流れは、解体、プレス、シュレッダー、分別された後、「有価物」は売却され、「無価値物」は焼却、廃棄される。

1.1.1 部品全部の回収はされない

解体においては、金属、非金属などの素材の種類毎に大きく仕分ける目的以外に、「有価値」である中古部品の回収行為が伴う。資源・エネルギーの有効利用の観点からすると、この段階ですべての廃車部品が回収されることが理想的である。しかし、ほとんど無傷でも需要がない場合は、「有価値」ではない。したがって、取り外しは経営的には無駄な行為である。売却コストが回収コストを上回る場合だけが「有価値」である。「もったいない」と言っても始まらない。

解体作業では、その他にその後の工程において危険有害なもの、回収資源の品質を著しく低下させるもの

を排除する。燃料タンク、鉛蓄電池、一部エンジンなどはそのような目的で取り外される。

1.1.2 異種素材の混入

プレス（+裁断）はシュレッダーのための準備作業のようなものだが、ガラスや一定のプラスチックなどの脆いものの粉碎、除去にも貢献している。ところが、プレス品を別業者から購入する場合には、中味についての保証はない。単品毎に内容物を検査する手段があったとして、その使用は回収コストの押し上げ要因として嫌われる。これは、例えば悪いが、喫煙者が吸いがらの散逸を気にとめて空き缶を吸いながら入れに使うようなものである。吸いながら再生資源の低品質を招くため、空き缶再生業者はいちいち吸いがらを除去しなければならない。悪意がなくてもこのような混入物は困り者である。確信犯とすれば重罪である。ステンレスや鉛のような粘いものが混じった時、裁断機やシュレッダーを停止させることもあると聞く。

ところが、自家プレスの場合でも各種の資源が混入してくるのは、現状では避けがたい。たとえシュレッダー粉碎しても、いったん巻き込まれた異種資源の完全分別は不可能である。一方、ある程度の異種資源の混入が許容できる側面もある。例えば、損傷したバンパーはシュレッダーに入れたとしても、その後のプロセスで主成分が金属中に入っていくことはなく、少量の金属分があったとしても再生金属がある程度の不純物含有が許容できる事情がある。経営手腕としては、再生過程での投入マンパワーをなるべく減らし、最終製品の高い品質を得ることができかが問われる。

1.1.3 高品位＝高コスト

さて、分別工程は各種あり、理論的技術的には資源毎に高品位で分別することが可能である。しかし、高品位を目指せば目指すほど、各種各段階の工程を動かすことになる。市場原理からは、各回収資源の売却コストとの見合いで、どの分別工程を動かすかの経営判断が求められることになる。スクラップコストの変動

* 金属材料技術研究所 力学特性研究部室長
〒305 つくば市千現 1-2-1

は大きく、ここでの決断力が経営の安定を保障するかどうかを決めると言って過言ではないだろう。手持ちの機械を動かせば回収できる資源も、「無価値」であれば適当に処分するしかない。

1.1.4 微量添加の終着点

「有価値」の回収資源は売却されることで、もう一度「生命」を与えられことになるが、「無価値」物が容易に売却、廃棄できるわけでない。安定型廃棄物であれば問題となる点は多少少ないが、有害物質を含む管理型であれば大問題である。再生業者はいったん「成仏」したものに、一方で「生命」を吹き込みながら、一方で「死後責任」まで負わされていることに留意していただきたい。すなわち、廃棄物に思わぬ物質（鉛、水銀、カドミウムなど）が予想できない濃度で存在することがある。偶発的なものも困るが、「原因不明」で常時検出される場合は重大問題と言わざるを得ない。自動車の例ではないが、被覆銅線の再生処理では被覆材の焼却処理で十分と当初思われたが、焼却灰に重金属が高濃度になり、単純に処分できないことが分かった。これは、被覆材のプラスチック成分の難燃化、安定化のために微量の重金属が積極的に添加されているのが原因と分かった。これらの事実が示すのは、素材や製品にほんの一部、ほんの微量と考えてつけ加えても、再生過程で、「有価物」が取り除かれ、焼却に問題のない物質が取り除かれたりする中で、次第に「有毒性」「難処理性」のものが濃化する自明の原理が働くことを意味する。

1.1.5 再生業に低品位の責任はない

再生業が製造者が丹念に組み立てたものを丹念に分解することで経済的に成立するならば、いままでに紹介した問題点の多くは解決できるかもしれない。「再生材は低品位」という世評があり、それも関連して「再生材は安くなくてはならない」という固定概念がある。構成部品、さらには構成素材別に完全に分別して戻すのに必要なコストを保障できているならば、再生材が低品位となることはないがその対価はバージン材コストを上回っても不思議ではない。逆に、なるべく安価な再生材を求めるならばある程度の低品位を許容せざるを得ない。

「低品位」等の責任を再生業に求めるのは筋違いである。製造物が本来分解が容易で、構成素材がリサイクルを前提とした配慮がなされていれば、再生プロセスの低コスト化、再生材の品質向上が初めて現実的な技術課題となる。再生を前提としないものを作り、再

生業に手品か魔術を要求する技術思想を問直すべきではないだろうか。

1.2 素材のマテリアルフロー²⁾

1.2.1 再生鉄は建築材料に

ところで、売却される金属資源の内最大のものは鉄鋼である。この鉄鋼スクラップは電気炉メーカーで再溶解され、ほとんどは建築用鋼材として「第二の人生」を与えられる。自動車に使われる鉄鋼材料は、わが国の鉄鋼生産技術の粋を尽くした最先端材料が使用されているが、それらは鉄鉱石から抽出されたばかりの、すなわち生まれたばかりのバージン材の鉄である。自動車として「定年」を迎えた鉄の第二の職場は、それほど厳しい性能を要求されない建築用材料であってよいのかもしれない。しかし、わが国の鉄鋼スクラップ発生量は今後共増加していくことが予想される。1年間に新しく製品となる内の総鉄鋼量は近年ほぼ1億トン前後を維持していると推定されるが、現在の鉄鋼スクラップ発生量は3,000万トン台である。使用量1億トンが維持されるとすると発生量は年々1億トンへ漸近していく。作っただけスクラップが発生する時代が到来した時に、自動車は生まれたての鉄で作られ、建築用材料はスクラップから作る現在の構図を維持できないのは明瞭である。まず、それほどの需要を建築分野に想定できない。現状から外挿される想定図は、1) スクラップを海外に大量に輸出する、2) スクラップを大量に備蓄する、3) 鉄鉱石による鉄鋼生産を大幅に減少させる、などであるが、いずれもわが国経済としての一大事である。

1.2.2 多品種化の問題

自動車スクラップ専用で鉄鋼を再溶解するというだけでは、鉄鋼スクラップ溶解は成り立っていない。空き缶、建築廃材、家電品廃材などなどの多種類のスクラップを原料にしている。各種スクラップの中に不可避免的に一定程度の異物の混入は避けられないとしても、実は鉄鋼材料自体が多品種である。

お米にも多品種あり、その味は水分や成分などの違いで変わるのかも知れないが、お米としての基本的な性質には大差はないだろう。しかし、鉄鋼材料の多品種さはそのようなものではない。様々な優れた性能を発現させる目的で、鉄に鉄以外の金属元素を積極的に混ぜる、すなわち合金にしている。

一定量使用されている代表的な鉄合金はステンレス鋼である。ステンレス鋼にも合金組成から大別して、クロム系とクロム-ニッケル系がある。これら組成的

に多くの合金量を含むもの（高合金という）は完全に一般の鉄鋼材料とは分離して回収されるべきであるが、一般家庭に入り込んだステンレスを別途回収するようにはなっていない。高合金は種類毎に再溶解することで十分高品位に再生することができるが、一般鉄鋼材料の再生プロセスに混じりこんだ場合、再生鉄に有効な合金効果を与えることもあるが、高純度の鉄に再生するという点では問題が多い。また、クロム、ニッケルなどの貴重資源の有効利用の観点からも避けたい。

わが国の再生鉄の品質を支えているのは、よくハンドリングされた自動車スクラップ、空き缶スクラップと型打ち抜き後の端材などの工場発生スクラップである。なかでも工場発生スクラップは一般に成分的に信頼が高く、最も良質の原料となっている。しかし、自動車スクラップには近年、銅含有量の増加傾向が現れている。これは、合金ではないが、自動車への各種小型モーター搭載が原因である。また、自動車では表面処理鋼板の使用量増加に伴い、スクラップ電気炉ガストへの亜鉛（メッキ材）濃化が現れている。亜鉛も希少資源であるため、有効な再生手段を講じていく必要がある。

1.3 エコマテリアル概念の提案

このように新しい素材や製品の提供は、一方で新しい利便の享受を与えるが、一方で思わぬ弊害をもたらしていることを認識する必要がある。作られたものをリサイクルさえすれば良いという捉え方は、科学的には重要な研究要素を持ち得ることもあるが、現代の技術を取りまく事情を全く考慮しない、浅薄な考え方になりかねない。

著者らは、それに対してエコマテリアル=Environment-Conscious Materials³⁾の材料設計として、「持続可能リサイクル設計」⁴⁾という考え方を提示し、材料や製品を地球環境に調和し、元来リサイクル可能・容易なものとして生産するアプローチを提案している。従来のリサイクルはいわば受け身であったのに比して、この考え方は、材料・製品のライフサイクルを丸ごと転換することによって根元的問題解決を目指す積極的なものである。全体を見直す立場からの発想という意味で、新しい材料・製品パラダイムを築く試みでもある。したがって、今までの学問、技術、知識の蓄積に立脚しながら、従来あまり重視してこなかった技術の再認識や全く新しい発想の技術展開を加えることによって、前進を図ることが期待されている。

2. 持続可能リサイクル設計が示す新しい設計要素

製品はいろいろな材料から構成される。したがって、豊かで安全で潤いのある社会を築き上げていくために、材料の役割が今までにも増して重要になるのは疑いがない。しかし、ここで少し立ち止まって従来の開発思想を見直してみる必要があることを前章で示した。持続可能リサイクル設計においてどのような新しい設計要素が求められるのかを素材面、構造面、性能面から整理すると、それらは相互に関連するが、

素材面におけるエコマテリアル性

構造面における解体容易性、再生容易性

性能面における適正バランス

とまとめることができる。現在までの支配的な設計思想は簡単に言えば性能／製造コスト比の追求である。また新しい製品、素材の開発では性能追求が相対的に第一義的である。

2.1 素材面でのエコマテリアル性

性能／製造コスト比追求型では、原料としては安価に入手でき、安価なプロセスで最終製品が製造できる素材を使い、製品の要求性能を達成することが求められる。これは、素材の種類については比較的無頓着な面があり、技術が進歩していくと「これでなくては絶対にできない」とする束縛から外れていくことがあり得る。飲料容器材料としては、木材でも、紙でも、プラスチックでも、ガラスでも、鉄でも、アルミニウムでも構わない。状況に応じた選択が可能になる。

性能追求第一義型では、素材の選択肢をむしろ狭めていく傾向がある。別の素材、別のプロセスで最高の成果ができれば、いとも簡単に技術は変化していく。特に急速な成長過程にある技術分野ではむしろ当然のことかもしれないが、最先端の技術力を動員、駆使し、適用することによって、次々と新しいものを出す。ここでは、最も性能発揮に適しているものという意味では素材の種類に無頓着で、その結果として、グレードアップされたものと原型のものを同じ再生処理ができないという例は枚挙にいとまがない。

持続可能リサイクル設計では、ここに大きな制約をかけることになる。

(1) 再生産可能な資源を優先して使うべきである。

生物生産物質は再生産可能な資源の代表例であるが、木材の有効利用を含めてまだまだ未踏の領域が多い。生物資源を起源とする、有機系のプラスチック、セル

コースなどの素材研究開発を戦略的に強力に進めるべきである。

(2) 潤渇性資源については、

- 資源量の豊富な物質を大量消費財に優先して使う
- 希少資源の使用範囲を限定する
- 再生可能な状態で使用する
- 毒性のある物質の使用は避ける

などが求められる。これは多くの場合、既存材料に対しての代替材料の開発を要求することになり、むしろ意欲的で粘り強い技術開発が求められる。金属学では、別名合金学と呼ぶくらい、今世紀において新合金の開発、すなわち複数の異なった元素の組み合わせで全く新しい性能を実現する研究開発が進んだ。そこでは、組み合わせの仕方に制限はなく、開発合金の成形さえできれば研究開発の新しい分野は開拓されてきた。それに対して、使用できる元素に一定の枠をはめるということは、金属学者を自縄自縛にする側面も生まれることになる。

大局的に見れば人類が使用する全物質の構成比は必然的に地殻中に存在する物質の構成比、すなわちクラーク数に接近していかざるを得ない。地殻資源はいずれも有限量であり、かつ利用できる水準は採掘が進めば低品位となり、比較的容易に利用できる資源として残るのはいずれも高クラーク数資源であることが推測されている。希少資源の再生利用は既に焦眉の課題である⁵⁾。

また、市場経済の原理から見ても、将来的には、資源が潤渇していく素材よりも再生可能な素材の方が製造コスト的に有利になる。実際に一定量の素材を定期的に製造するプロセスを考えた時、端材、故障材、回収材などが再利用できて、歩留まりを高く維持できる方が有利である。もしある製造者が再生不能な素材を使用し、もう一方の製造者が再生可能な素材を使用し、双方が同等の性能を提供できるとしたら、長期的には後者が生き残るのは自明ではないだろうか。悪く言えば、再生不能な資源を使っている製造者は技術的に遅れていると見られるようになるだろう。

2.2 構造面における解体容易性、再生容易性

性能/製造コスト比追求型では、一定の性能が達成された後は、最終的には安価なプロセス追求に帰着する。工程の省略、各工程の低コスト化などが検討要素であろう。したがって、溶接構造であるか他の接合構造であるかは、むしろコスト面からの選択になる。規制が溶接構造であれば溶接構造、規制が溶接構造を忌

避すれば他の方法というように変化する余地はある。

性能追求第一義型では、構造依存型となる傾向がある。製品においては、形状、大きさ、部品配置、配線、配管などの最適化が目標性能追求優先で行われる。したがって、複雑な構造、新機種と旧機種における部品の非互換性、多種類の異種素材の組み合わせなどが許されることになる。

製品に限らず素材においてもそうであるため、時にはリサイクル性を考えると検討の余地なしと判断せざるを得ないものが出てくる。わかりやすくするために複合材料を例示するが、複合材料は異質の素材を組み合わせることによって、それぞれの素材の良さを合わせ持つ新しい素材を生み出すという優れたアイデアで、前述した合金学と似たところがある。ところが、異種のものどうしを組み合わせるため、それらの密着性をあげることなしには複合材料は使いものにならない。したがって、高性能の複合材料とは構成要素の密着性が高いものになる。解体容易性とは正反対の追求となりがちである。現状では複合材料一般にリサイクル性を付与することが極めて困難である。

持続可能リサイクル設計では、再生過程における解体容易性、再生容易性を追求課題とする。しかし、使用時は強く結びつき、再生時に簡単に分解するというのはいかに虫のいい要求である。製品の場合において、組立、接合方式の検討によって構造設計指針を変更する比較的現実的なアプローチがある。それに対して、素材、材料のレベルでは、発想の転換が強く求められる。

新しい発想の例として、結合力が環境条件によって変化することを利用するアプローチが考えられる。例えば材料は低温で強くなるが、脆くもなる。したがって、使用温度では脆さが問題にならず、ある温度以下に冷却し破碎すると構成要素どうしの界面が剥離するという設計は可能である。また、逆にある温度以上ある温度以下で、構成要素の一部が完全に融けてしまうというのも設計可能である。化学反応によって結合力を弱める、もしくは分解するというのも利用できる。このように今までは弱点として考えてきたことを逆にうまく利用することも有力である。

また、別の発想として、素材が同じで異なった性質を示すものを複合するという考え方がありえる。材料の性質はその構造に強く依存する。同じ素材で違う構造を作ることができる場合にこの考え方が適用できる。

例えば、織物を考えてみる。同じ素材の繊維から成

る場合でも、糸の作り方、織り方、すなわち構造によって、強度、保温性、透湿性などを変化させることができる。これらの構造の選択肢は無限であり、したがって、織り方が表面に現れる地紋、意匠性にも無限の可能性がある。異なった構造の組み合わせの可能性を考えてみても、未だ汲み尽くせていないと言える。これに対して従来の複合材料は異なった素材の組み合わせを中心にしてきた。確かに、織物でも異種素材の繊維を組み合わせる方が、より容易に組み合わせの可能性を利用できるだろう。色彩にしても多色の方が選択肢が豊富のように感じられる。しかし、墨絵（モノトーン）と油彩画（カラー）の芸術性の優劣を論じることができないように、単一素材での組み合わせの可能性に最初から限界を持たせることはないだろう。絵画基本はデッサンというように、性質の構造依存性を最大限に活用し、再生容易な単一素材で独自の技術世界を築く技術展開が素材設計でも期待されている。

2.3 性能面における適正バランス

適正バランスを考える動機にはいくつかある。第一に過剰性能は資源・エネルギーの無駄使いである可能性が高いのでそれを見直すことである。第二には、いままでの価値基準を見直すことである。

多機能製品がひと頃もてはやされたが、購入してから捨てるまで一度も利用しない機能もあるのではないだろうか。また、必要以上の性能が付与されている場合も多い。ある車検整備工場の人が言っていたが、時速140キロも出せる車を認めておいて、一方で日本の交通事情を論じたり、交通事故防止を論じているのは不条理である。いままではこれを使用者の良識の問題で片づけてきたが、100キロ以上出さない「良識」人も140キロ以上の不使用性能を購入しているという「不公平」は今後問題になっていくだろう。

このように製品に関する価値判断は、複雑でかつ変動的、相対的である。これを客観的根拠を持って公平な判断基準となるような情報にまで持っていくには、試行錯誤は止むを得まい。

昔、中学校で習った、「肥料の三要素、リービッヒの最少律」は現在も認められた原則かどうかは知らないが、農作物の育成には、N、P、Kの三要素肥料が不可欠で、それぞれの最低必要量はある程度定まっています。それを補充するために人工添加するが、必要量以下では必要量に比して最も低いレベルの要素で生長は律速されるというような内容だったと思う。したがって、必要最低量を把握してバランス良く肥料配合を行

え、必要以上は無駄だ、という極めて実践的な技術指導原則と感じていた。工業製品にこのような原則を聞いたことがないが、工業製品の開発思想は農業のレベルに未だ達していないということだろうか。

製品の一生がいかに資源・エネルギーを使用し、新たな排出物質を生むかを定量化しようという試みも盛んになっている。この点については、既に多くの紹介⁶⁾がなされているので略すが、客観性、統一性の保持が課題である。プロセスを含めたライフサイクルのエコバランスは勿論、製造コストとの和解を視野に入れた検討が可能かどうかが目される。

3. 金属材料におけるプロトタイプ

金属材料において、リサイクルを前提としてかつ複数の性質をバランス良く実現する方法のひとつとして注目を浴びているのが、複数の組織や部分的変化の利用である（ヘテロ構造）。鉄鋼材料では変態等を利用して複相組織を出したり、部分的に組織を変化させることができる。強度-延性バランスの改善は、複相組織の種類、構造を制御することによって改善することができる⁷⁾。ここでは、むしろ合金元素の役割は間接的なものとなる。他の金属でも合金系を選択すれば、ヘテロ構造を前提とした検討が可能である。

ヘテロ構造の基本は、複合材料と同じである。しかし、ヘテロ構造はある単一の合金組成から作り込むことができるという点で、従来の複合材料と全く異なっている。再生上問題のない元素だけで構成されていれば、ヘテロ構造金属は「電気炉で再溶解する」だけで十分で、「溶鉱炉にもどす」必要もない。

(1) 部分的に結晶粒を微細化し、ニッケルフリーに大型構造物では、脆性破壊による損害を最少限化することが求められるが、鉄鋼材料においては従来ニッケルの添加が鉄鋼の性質を改善する元素として知られている。しかし、金属組織の面から言えば、結晶粒を微細化すれば同じ効果があることも分かっている。

ある条件下で使用される鋼板では表層部がその脆性破壊の進展に抵抗があれば十分である。そこで、加熱中の変態現象を利用すれば組織が微細化する現象をうまく利用して、表層部5mm程度だけが、内部の5/1以下の細かい結晶粒とできるプロセスが最近開発された⁸⁾。

これは、鉄鋼の再生にとって邪魔なニッケルを含まない素材を用い、ニッケル含有合金と同等の性質をヘテロ構造を作り込むことによって達成した一例である。

(2) 難加工性アルミ鑄造合金の可塑性⁹⁾

今後の材料開発において、従来の枠の中で可能性を探すだけでなく、全く新しい分野、領域を探索、開拓していく必要がある。

アルミ合金は従来の金属組織の可変性に乏しく、時効析出を利用した材料として開発の飽和感のある材料となっている。しかし、資源量などから考えても将来さらに一般材料として有効に利用がなされなくてはならないもののひとつである。

著者等は、既に実用化されているAl-Si系合金が鑄造合金として使用されるだけで、展伸合金としては考えられていないが、その組織がシリコン晶とアルミニウム母相の複数の組織から成っていることに着目した。共晶合金と呼ばれるAl-12%Si(シルミン)を室温で加工すると変形の与え方によるが、変形量で20%から40%程度の加工で割れてしまう難加工性の合金である。しかも、その割れはシリコン晶の割れに起因していることが分かった。そこで、ある加工熱処理法を用いて、シリコン晶を1/5程度に微細化したところ、90%以上の室温加工が可能になった。フォイルへの加工も可能になった。しかも、強さが元の2倍以上となるなど、従来の常識を破る結果が得られている。

4. 最後に

リサイクルはどうあるべきかを出発点に現状を分析

し、持続可能リサイクル設計という概念に行き着いた。さらに、それを実現していくための技術的課題を絞り込みつつ、その適用例の実践に取り組んでいる。したがって、この課題はまだ不十分な段階にある。だが、実践例に近づけば近づくほど、今までの知見の上に立って発展方向を冷静に模索する以外にないことに改めて気付かされる。

参考文献

- 1) 多屋貞男; リサイクルの問題点, 特に自動車処理について, エコマテリアル研究会第3回ワークショップ資料(1994. 3), 未踏科学技術協会.
- 2) 長井寿; 金属の完全リサイクル体系を考える, 金属, 10号(1993), 65-70.
- 3) 山本良一編著; 地球にやさしい材料革命, エコマテリアルのすべて(1994), 日本実業出版社.
- 4) 長井寿編著; 持続可能リサイクル設計入門(1995), 未踏科学技術協会エコマテリアル研究会, 化学工業日報社.
- 5) 西山孝; 資源経済学のすすめ(1993), 中公新書.
- 6) 未踏科学技術協会エコマテリアル研究会編; LCAのすべて—環境への負荷を評価する—(1995), 工業調査会.
- 7) 長井寿; リサイカブル材料設計, あたりあ, 33巻, 8号, (1994), 524-530.
- 8) 石川忠, 野見山祐治, 萩原行人, 粟飯原周二; 表層超微細粒鋼の脆性き裂電波停止特性, 日本造船学会論文集, 177号, (1995), 259-267.
- 9) 長井寿, 梅澤修, 由利哲美; 未発表, 1996年日本金属学会春期講演大会にて発表予定.

