

リサイクル特性を反映した鉄鋼材料のLCA

小野 透 ONO Toru
新日鐵住金株式会社

岡崎 照夫 OKAZAKI Teruo
日鉄住金総研株式会社

田中 陽子 TANAKA Yoko
日鉄住金総研株式会社

北山 未央 KITAYAMA Mio
日鉄住金総研株式会社

製品環境負荷の評価には、使用時の負荷に加えて、その製品の製造段階および製品寿命到達後の最終処分やリサイクルを含めたライフサイクル全体での資源・エネルギー消費に伴う負荷を考える「Life Cycle Thinking」が重要である。鉄鋼材料は製品寿命到達後スクラップとして回収され、新たに鉄鋼製品として生まれ変わるという優れたリサイクル特性を有しており、これは製造時の環境負荷低減、天然資源採掘量および廃棄物処理量削減への寄与の観点から適切に評価される必要がある。本報では、持続可能な材料リサイクルの条件を明らかにした上で、鉄鋼材料の特徴を記述し、それを反映したLCA手法(worldsteel LCA方法論)を解説する。

はじめに

自動車や家電製品あるいは建物など(以下「最終製品」という)を構成する「材料」に求められる最も重要な要素は、強度や比強度や耐熱性などの「使用時の材料機能」であろう。しかし、それぞれの材料がどれだけの環境負荷をもって製造されたのか、また自動車などの最終製品が寿命(EoL: End of Life)を迎えたあと、それを構成していた材料がどのように最終処分、あるいはリサイクルされるのかも、材料を評価する上で極めて重要な要素である。

材料のLCA*1を考える上で、資源採掘から材料製品の生産まで(Cradle to Gate)の評価については考え方が確立しているといえるだろうが、最終製品寿命到達後の材料リサイクル(End of Life Recycling)の評価については、一般に浸透しているとは言い難い。

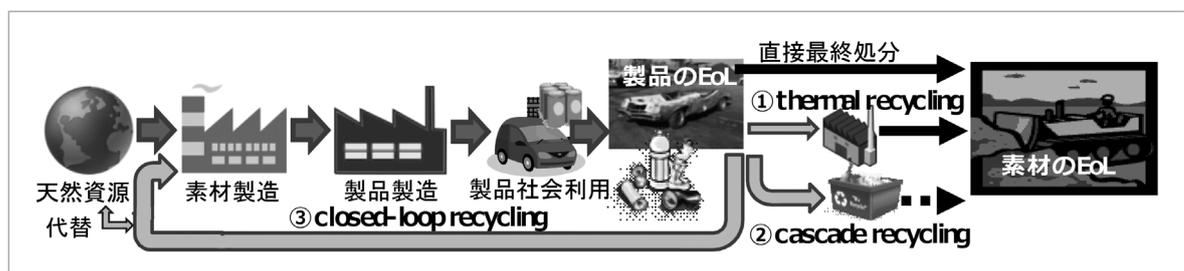
材料にとってリサイクルは、その製造に係る環境負荷低減に加え、天然資源採掘量や廃棄物処理量の削減

など、その材料の持続可能性に大きな影響を与える要素であり、LCAにおいてもリサイクルの影響・効果を正確に把握、反映する必要がある。

1. 素材のライフサイクルとリサイクル

自動車や家電製品など私たちの生活を支える最終製品は、その利用が終了し廃棄された時点で寿命(EoL)を迎える。しかし、それらの最終製品を構成している材料は、最終製品のEoL後、様々な運命をたどることになる。一部の材料は技術的、経済的な要因でリサイクルされることなく直接最終処分され、最終製品のEoLとともにその材料もEoLを迎えるが、多くの材料は様々な形でリサイクルされることになる。材料のリサイクル手法としては、① thermal recycling、② cascade recycling、③ closed-loop recyclingに大別される(図1)。

図1 / 素材のライフサイクルとリサイクル



① thermal recycling (open-loop recycling)

廃棄物の焼却に伴う熱によって電力や蒸気を回収する手法。廃棄物減容化の必要性から実施されることもある。同一材料製造のための天然資源消費量削減効果はなく、廃棄物(燃焼灰等)の処分が必要となる。

② cascade recycling (open-loop recycling)

同じ材料へのリサイクル、他材料へのリサイクルにかかわらず、性質の劣化・変化を伴う有限のリサイクル手法。バージン材料製造のための資源代替効果はなく、最終的にはリサイクルによる品質低下により廃棄されることとなる。

③ closed-loop recycling

材料の持つ本来性質を損なうことがない形で同じ材料製品の原料としてリサイクルされる手法。リサイクルによる本来性質の変化がないため、無限にリサイクルが可能となる。open-loop recycling(thermal recycling, cascade recycling)が不可逆的なマテリアルサイクルであることに対して、closed-loop recyclingは可逆的なマテリアルサイクルであり、新たに投入される天然資源消費量の削減や、それに伴う環境負荷物質排出量の低減、廃棄物の削減が図られることから、open-loop recyclingよりも持続可能性(サステナビリティ)の点で優れる。

ルや道路などの素材として利用される③)。そして鉄鋼製品を使ったそれらの最終製品は、社会において必要な機能を果たしたあと、最終製品としての寿命(EoL)を迎える④)。鉄鋼材料は、最終製品が寿命を迎えたあと、スクラップとして回収され⑤)、再び新たな鉄鋼製品の原料として再利用される。スクラップは新たに投入される天然資源を代替し消費エネルギーの削減及び環境負荷削減効果をもたらす⑥)。再び新たな鉄鋼製品として生まれ変わった鉄鋼材料は第二のライフサイクルに入る⑦)。そして再びスクラップとして回収され⑧)、その後も同じライフサイクルが無限に繰り返されることになる(無限のclosed-loop recycling)。

3. 持続可能な材料リサイクルを可能とする要件

最終製品 EoL 後の材料がどのようにリサイクルされるかは、社会的・経済的な条件に加え、それぞれの材料が本質的に有している特性に左右される。下記に持続可能な材料リサイクルのための条件を示す。(1)～(3)は、どのようなリサイクルシステムにおいても必要な条件であるが、(4)、(5)の要件は、特にclosed-loop recyclingのための要件である。

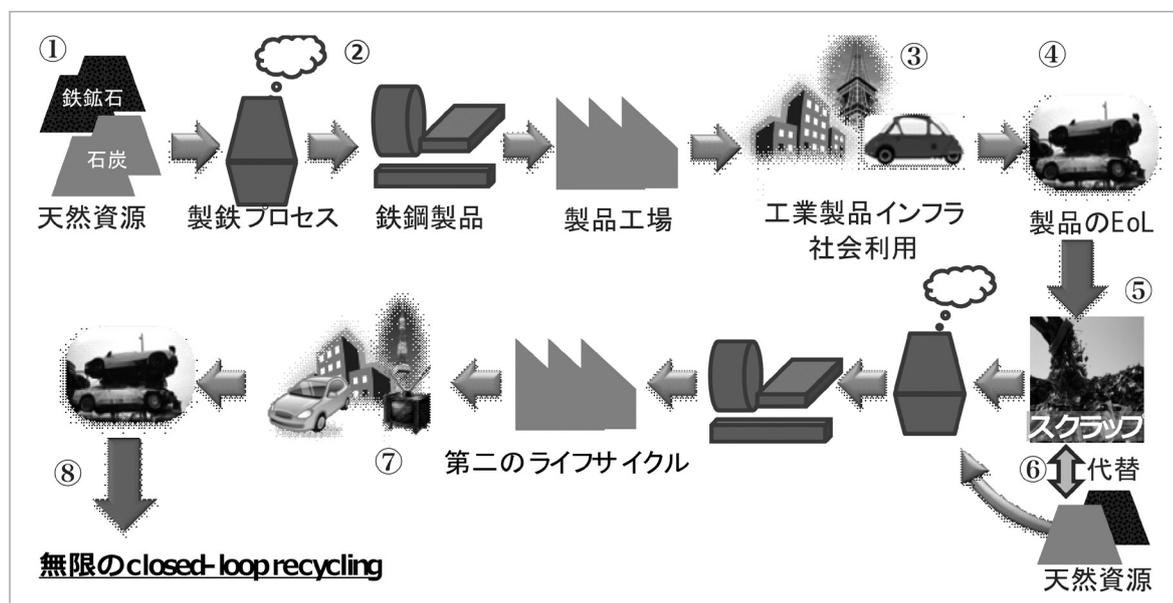
(1) 分別が簡単にできること

ほとんどすべての工業製品は単一の材料で構成されていることはない。材料のリサイクルのためには、他材料と簡単に分別できなければならない。鉄鋼材料は磁性を持ち、磁力選別によって容易に他素材と分別が可能であり、シュレッダーダストやその焼却灰などに含まれる微小な鉄片でさえも回収することができる。

2. 鉄鋼製品のライフサイクルとリサイクル

鉄鋼製品のライフサイクルの概要を図2に示す。まず天然資源である鉄鉱石①を還元・精錬し、圧延・熱処理・表面処理等多くのプロセスを経て、様々な特性、形状を持った鉄鋼製品が製造される②)。出荷された鉄鋼製品は自動車や家電製品などの耐久消費財、ビ

図2／鉄鋼製品のライフサイクルとリサイクル



て除去することができる。

鉄の場合、多くの元素は精錬の過程でガス化したり、あるいは酸化物として除去することができるが、その他の金属の場合、多くの元素が分離不可能なまま熔融金属中の不純物となり(水に溶けたインクのような状態)、再生材の品質を劣化させることが読み取れる。平木らは「一般的な不純物除去法である酸化や揮発では、軽金属リサイクルにおいてほとんどの不純物が除去不可能な傾向にある。そのためリサイクルが繰り返されるほど不純物は濃化し、リサイクルにおけるコストや環境負荷の増加を招く。軽金属リサイクルが持続的に確立されるため、リサイクル技術のさらなる発展はもちろん、市中スクラップの組成を重視した選別技術の構築や、社会システムにおけるスクラップ管理が重要」と指摘している。今後、自動車など様々な製品分野においてマルチマテリアル化が進むものと考えられるが、サステナビリティと両立していくには、鉄鋼以外の素材についても信頼のおけるリサイクルシステムの構築が必要である。

鉄鋼材料にも除去困難な元素(トランプエレメント)があるが、世界の鉄鋼需要が老廃スクラップの発生量よりはるかに大きく、天然資源ルートの原料供給が過半を占めている現状において、マクロ的にはリサイクルを困難にするような大きな問題とはなっていない。

しかし将来、社会蓄積から発生するスクラップの鉄鋼原料に占める割合が拡大する局面に備えて、トランプエレメントの各種鋼材特性に与える影響やその無害化技術に関する研究³⁾が進められている。また我が国にお

いては、スクラップ品質に関する規格⁴⁾の整備、老廃スクラップ回収時のトランプエレメント除去に関する研究や仕組みの構築⁵⁾が進められるなど、鉄鋼材料のリサイクルシステム維持のための取組が鋭意行われている。

4. 鉄鋼材料のリサイクル率

鉄鋼材料は自動車やビルなど、様々なライフタイムをもつ最終製品に利用されるため、すべての鉄鋼材料のリサイクル率を計測するのは困難である。その中で、ライフタイムが比較的短い容器と、法律によって数量が管理されている自動車については、比較的正確なりサイクル率を計測、推計することができる。

表1に容器材質別のリサイクル率を示す。工業会によって定義の違いはあるが、スチール缶は他素材に比べ高いリサイクル率を示していることがわかる。

表2に、国内解体対象台数と自動車リサイクル法(自り法)処理台数との比率から計算される「自動車に使用された鉄鋼材料の見掛けリサイクル率」を示す。鉄鋼材料は、自動車リサイクル処理プロセスの中でスクラップとしてほぼ全量が回収されるため、台数ベースでのリサイクル率推計が可能と考えられる。なお、国内解体対象台数と自り法処理台数との乖離分($f-g$)は、量的に観て統計上の誤差や廃車後の放置などに加え、パーツとして国内外で再利用されたもので統計補足されていないものなどが多く含まれていると推定され、実際のリサイクル率はさらに高いものになると推認される。

表1 / 容器材質別のリサイクル率(各工業会調べ)

素材	%	算出方法
スチール缶	92.0 (2014FY)	国内スチール缶回収・再資源化重量/スチール缶消費重量(スチール缶=飲料缶+食料缶+一般缶+18リットル缶の一部)
ガラス瓶	67.3 (2013FY)	再商品化量/国内消費量
PETボトル	85.8 (2013FY)	リサイクル量(国内+海外再資源化量)/国内PETボトル販売量
紙製容器包装	23.5 (2013FY)	紙製容器包装の回収実績/家庭から排出される紙製容器包装総量
プラスチック容器包装	44.4 (2013FY)	再商品化量+自主回収量/排出見込量
アルミ缶	87.4 (2014FY)	再生利用重量/アルミ缶消費重量(アルミ缶=飲料缶)
紙パック	44.6 (2013FY)	国内紙パック回収量/飲料用紙パック原紙使用量(損紙、古紙含む)
段ボール	99.4 (2013FY)	段ボール古紙(製紙受入量+[輸出量-輸入量])×(段ボール原紙消費量/製紙メーカーの段ボール原紙出荷量×0.988)/(段ボール工場の段ボール原紙消費量+輸出入製品に付随する段ボールの入超量)

表2 / 自動車に使用された鉄鋼材料の見掛けリサイクル率

単位：1,000台

	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
前年末保有台数 a	75,324	75,362	75,513	76,126	76,619	77,188
当年新車販売 b	4,956	4,210	5,370	5,376	5,563	5,047
当年末保有台数 c	75,362	75,513	76,126	76,619	77,188	77,404
廃車台数 d=a+b-c	4,919	4,059	4,757	4,882	4,993	4,831
中古車輸出 e	866	846	988	1,107	1,245	1,245
国内解体対象 f=d-e	4,053	3,214	3,769	3,775	3,749	3,586
自り法処理台数 g	3,926	2,872	3,405	3,365	3,399	3,206
乖離 f-g	127	342	364	410	350	380
見掛けリサイクル率 g/f	97%	89%	90%	89%	91%	89%

(出典：日本自動車工業会、自動車リサイクル促進センター、財務省貿易統計より作成)

5. closed-loop recyclingを反映した鉄鋼製品のLCA

材料のLCAを考えると、その原料採掘から製品製造に係る環境負荷や資源消費に加え、最終製品EoL後の材料のリサイクル効果を正しく評価することは極めて重要である。

スクラップは転炉においても電炉においても原料として利用されるが、すでに還元されているため、天然資源の有効利用に加え、還元工程省略に伴うエネルギー消費量の削減や環境負荷の低減効果を得ることができる。すなわちスクラップは環境価値を有していることになる。しかもスクラップは廃棄物とは異なり余すことなく有価の資源として世界中で流通していることから、鉄鋼材料のLCAにおいて、スクラップの環境価値を適正に評価する必要がある。

worldsteel*²では、鉄鋼材料について、最終製品EoL後のリサイクルを反映した鉄鋼製品のLCA方法論を開発した⁶⁾。同方法論の大きな特徴は次の通りである。

- ・ 高炉法・電炉法を一つの鋼材循環システムとして評価
- ・ スクラップは、その利用によって削減される天然資源、環境負荷低減効果等を反映した「環境価値」を持つ
- ・ 鉄鋼製品製造にあたってスクラップを使用する場合には、スクラップの環境価値にスクラップ使用量を乗じたものを、スクラップ使用に伴う環境負荷として鉄鋼製品のLCAに反映する
- ・ 最終製品の寿命到達後に生じる鉄鋼材料のリサイクルに伴う便益を評価するため、スクラップ環境価

値にリサイクル率を乗じて鉄鋼製品のLCAに反映する

ここで同方法論に基づく簡単なLCI*³試算例を示す。スクラップは転炉においても電炉においても使用され、ほぼ同じ環境負荷低減効果があるが、ここでは簡単化のために高炉転炉法を100%天然資源ルート(以下BOF*⁴ルートという)、電炉法を100%スクラップルート(EAF*⁵ルートという)とする。

BOFルートでの鉄鋼生産1tあたりのCradle to Gate (CtG)の環境負荷を100、EAFルートでは25と仮定し、さらに電炉での歩留を0.9とすると、

$$\begin{aligned} & 1tのスクラップの環境価値 \\ & = (100 - 25) \times 0.9 = 67.5 \end{aligned}$$

となる。

このため、EAFルートでの鉄鋼生産1tに対してのスクラップ利用に伴う負荷(Burden for scrap use)は、1tあたり67.5の環境価値を持つスクラップを歩留(0.9)で割増した分使用するので、

$$\text{Burden for scrap use} = 67.5 / 0.9 = 75$$

となる。

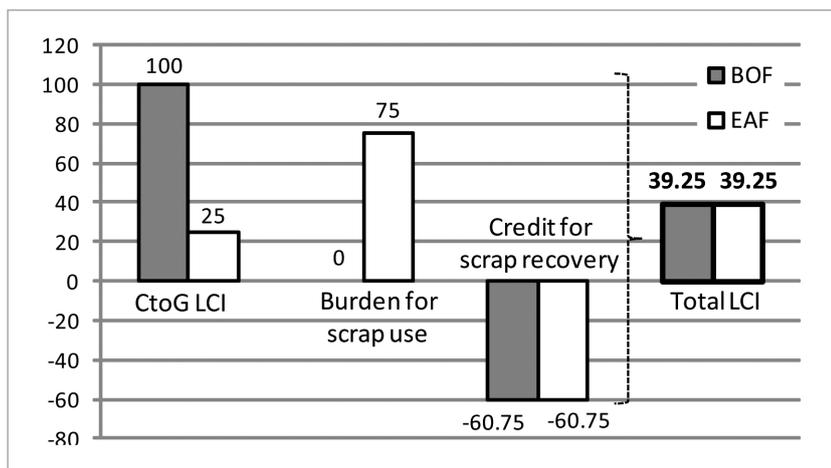
また、スクラップ回収率を0.9とした場合、生産した鉄鋼製品が将来のスクラップとして回収されることに伴うクレジット(Credit for scrap recovery)は、

$$\text{Credit for scrap recovery} = -67.5 \times 0.9 = -60.75$$

となる。

図4に以上の計算結果を図示するが、本方法論を用いると、Cradle to Gate負荷とBurden for scrap use

図4 / worldsteel LCA 方法論による試算例



並びにCredit for scrap recoveryを合計した鉄鋼製品1tあたりのTotal LCIは、BOFルートもEAFルートも39.25で、同じ値となることがわかる。

worldsteelでは、5年ごとに同方法論に基づく鉄鋼製品のLCIデータの収集を行っている。直近の2015年度データ収集には、世界42事業者の105事業所が参加を表明し、内日本からは16事業者、26事業所が参加している。

- 2) 平木岳人 et al., 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会、2012
- 3) 例えば、J. P. Birat et al., Effects of tramp elements in flat and long products, European Commission, 1995
- 4) JIS-G2401、鉄くず分類基準
- 5) 経済産業省、自動車リサイクルに係る処理技術等の調査
- 6) World Steel Association, Life Cycle Assessment Methodology Report, 2011

6. 結言

本稿では、鉄鋼材料のリサイクルの特徴を踏まえたLCA手法(worldsteel LCA方法論)を紹介したが、自動車や家電製品などの最終製品についても、それが使用されている間の負荷(例えば自動車の燃費)だけではなく、その製品の製造段階や、製品寿命到達後の最終処分やリサイクルを含めたライフサイクル全体での資源・エネルギー消費やそれに伴う環境負荷を考えることが重要であることは論をまたない。特に水素など新しいエネルギーキャリアの登場や、再生可能エネルギー導入拡大など、消費するエネルギーのLCIの大きな変化の可能性を考え併せると、Life Cycle Thinkingの重要性は一層高まるものと考えられる。

- *1 Life Cycle Assessment
- *2 World Steel Association (<https://www.worldsteel.org/>): 150以上の世界の主要鉄鋼メーカーで構成される組織
- *3 Life Cycle Inventory
- *4 Basic Oxygen Furnace
- *5 Electric Arc Furnace

【参考文献】

- 1) 日本アルミニウム協会、3Rシステム化可能性調査事業-アルミニウム展伸材スクラップから展伸材へのリサイクルの可能性調査事業-、2007