



使用済みプラスチックの 微粉化・高炉還元材利用技術の開発

Pulverizing Technology of Used Plastics as Alternative
Reducing Agent of Blast Furnace

鷲見郁宏
Ikuhiro Sumi

JFEスチール (株)
スチール研究所
環境プロセス研究部長

1 はじめに

原料炭の高騰やコークス炉の老朽化を背景に、高炉羽口からの補助還元材吹込みの拡大・多様化が望まれている。1960年代には補助還元材として重油の吹込みが実施されたが、その後のオイルショックを契機として微粉炭の吹込みが盛んに行われるようになった^{1,2)}。ここで、プラスチックの高温熱分解により生じる水素や一酸化炭素もまた、高炉内において酸化鉄の還元材としての役割を果たし、特に使用済みプラスチックの利用(高炉原料化)は、ほとんどの資源を海外に依存する我が国にとって循環型社会構築の観点から有効と考えられる。使用済みプラスチックの利用は、石炭やコークス等の化石燃料の使用量を削減できるため、CO₂排出量削減技術としても位置付けられている³⁾。

2013年度の統計によれば、使用済みプラスチックは一般廃棄物と産業廃棄物を合わせておよそ940万トン発生しており、リサイクルの意義は大きい⁴⁾。その処理方法は、過去には埋立や焼却が主流であったが、1995年に容器包装プラスチックのリサイクルに関する法律が整備(一部施行)されると熱回収利用や再生利用等の有効利用率が急速に増加した。

こうした背景を受け、使用済みプラスチックの高炉リサイクル技術に関する検討がなされ、1996年にJFEスチールが実高炉への吹込みを開始した^{5,6)}。プラスチックは常温において延性が大きく、微粉化が難しい材料であり、これまで高炉吹込み材料として10mm程度の粒状物が用いられてきた。しかし、一般に固体粒子のガス化反応は粒子径(比表面積)に依存し、微粉化するほどガス化性は向上するため、プラスチックの安価な微粉化技術が望まれていた⁷⁾。本稿では、使用済みプラスチックの特性を生かした新しい微粉化技術の開発について述べる。本技術は使用済みプラスチックのガス化性を、現在

広く普及している微粉炭と同等、あるいはそれ以上に高めることを可能とし、大型高炉における使用済みプラスチックの安定使用に貢献している。

(本開発技術は、2012年日経地球環境技術賞、第40回(2013年度)岩谷直治記念賞を受賞した。)

2 高炉における使用済みプラスチックの利用技術

2.1 高炉への粒状プラスチック吹込み技術

高炉プロセスの概要を図1に示す。炉頂部より原料となる鉄鉱石とコークスを装入し、炉下部側面に設置した羽口と呼ばれる部分より1000℃を超える高温の空気を吹込む。これにより炉下部でコークスが燃焼し、生成する高温・還元性ガス(水素・一酸化炭素)が鉄鉱石を還元・熔融し金属鉄(銑鉄)を製造する。近年の大型高炉においては一日の生産量が1万トンを超えるものもある。羽口先の燃焼領域は2000℃を超え、ここに補助還元材として使用済みプラスチックを供給することで熱分解により還元性ガスを生成し、還元材であるコーク

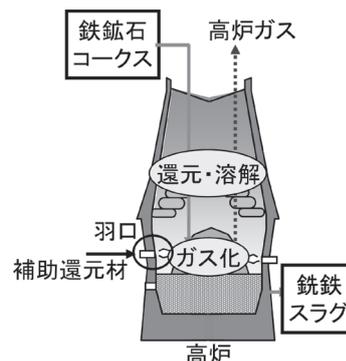


図1 高炉プロセス概要

スの一部を代替して有効利用することが可能と考えた。

図2はJFEスチールにおける使用済みプラスチックの高炉原料化(粒状化)フローを示す。およそ1m角に加工された使用済みプラスチック(ペール)が搬入されると、はじめに解砕機を通過した後、傾斜揺動式分離装置によりフィルム系、固形系に分別される。固形系プラスチックは破碎機により概ね10mm程度に軽破碎され、貯留槽へ輸送される(破碎プラ)。一方、フィルム系プラスチックは造粒機(押し出し式造粒装置)で長さがおよそ10ミリ、直径数ミリ程度の粒状物に加工され、貯留槽へ輸送される(造粒プラ)。その後、破碎プラおよび造粒プラ混合物は空気輸送され高炉へ吹込まれる。

この方法は、使用済みプラスチックの前処理方法として簡便であり、1996年の使用済みプラスチック高炉原料化開始当初からベース技術として使用されている。

2.2 使用済みプラスチックの微粉化技術の開発

2.2.1 単一粒子のガス化性評価

前章で述べたように、使用済みプラスチックは従来10mm程度に加工されて高炉に吹込まれていたが、これは微粉化が困難であったことと、ハンドリングや気流輸送の容易性を考慮した結果である。しかしながら、高炉内における使用済みプラスチックのガス化性に及ぼす粒径の影響は必ずしも明確ではなかった。そこで、高炉吹込みに適したプラスチック粒子の粒径を明らかとするため、単一粒子のレーザー急速加熱時のガス化特性を評価した。200 μ mおよび500 μ mに篩分けした使用済みプラスチック(揮発分84.4wt%、固定炭素:8.2wt%、灰分:7.4wt%)に常圧、大気雰囲気下でレーザー(出力3.5W、ビーム径2mm)を照射して粒子の状態を観察した。成分の均一性を確保するため、使用済みプラスチックは熔融混合した後、冷凍粉碎したものを用いた。比較のため、揮発分濃度の異なるJ炭(揮発分31.2wt%、固定炭素:58.7wt%、灰分:10.2wt%)とY炭(揮発分10.8wt%、固定炭素:77.4wt%、灰分:11.8wt%)も同時に試験した。図3にJ炭、Y炭および使用済みプラスチック(200 μ m、500 μ m)のガス化状況を示す。J炭とY炭を比較すると、揮発分の高いJ炭の方が反応が早い傾向を

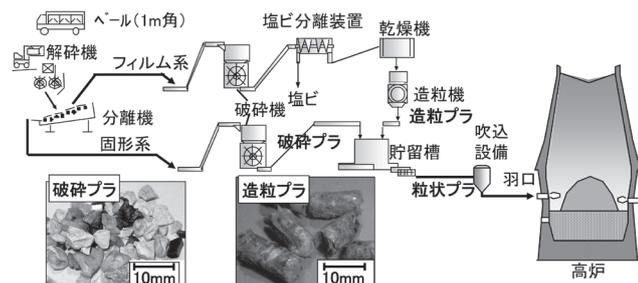


図2 使用済みプラスチック高炉原料化(粒状化物製造)フロー

示した。200 μ mの使用済みプラスチックでは、ガス化に伴い粒径が小さくなる傾向を示し、表面から揮発分を放出していることが伺える。そのガス化速度はJ炭と同等と観察された。500 μ mの比較的粗粒の使用済みプラスチックは、着火は遅い。これらの試験から、初期(ガス化前)粒子の粒径がガス化完了時間に及ぼす影響を整理し、結果を図4に示す。

石炭の場合、粒径が大きくなるに従い、ガス化に要する時間が顕著に増加し、揮発分(VM)が多い石炭の方が、ガス化完了時間が短くなる傾向を示す。一方、プラスチックの場合はガス化完了時間に及ぼす粒径の影響は緩やかである。高炉で使用される微粉炭の粒径が200mesh(74 μ m)程度であることを考慮すると、微粉炭と同程度のガス化特性を持つためにプラスチックは0.4mm程度にまで粉碎することが望ましいことがわかる。

2.2.2 使用済みプラスチックの微粉化原理

プラスチックのような常温で延性の大きい材料を微粉化する技術として、たとえば冷凍粉碎がある。この方法は、プラス

	経過時間 (ms)					
	0	40	80	100	300	400
J炭						
Y炭						
プラスチック(200 μ m)					140ms	
プラスチック(500 μ m)				120ms		

雰囲気: 空気, レーザー出力: 3.5W

図3 石炭およびプラスチック単一粒子のガス化挙動

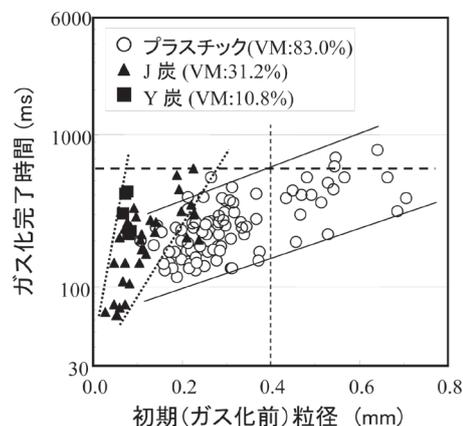


図4 初期粒子の粒径がガス化完了時間に及ぼす影響

チックをガラス転移点以下まで冷却することにより延性を奪い微粉碎する技術であるが、冷却のために多大なエネルギーを要し経済的ではない。そこで図5に示す新たなプラスチック微粉碎技術を開発した。一般に使用済みプラスチックは、図5の①に示すように複数の種類のプラスチックから成る混合物である。これらを加熱・混練することで熔融・混合する(図5の②)。この状態から冷却すると線膨張率の違いから、異種プラスチックの界面において微細な亀裂が生成する。このため元のプラスチックに比較し著しく強度が低下することが分かった(図5の③)。この亀裂を含有するプラスチックは容易に微粉碎することが可能となる。

2.2.3 使用済みプラスチックの粉碎性に及ぼす熔融温度の影響

前章で述べた微粉化原理を検証するために、使用済みプラスチックを熔融処理した後、その粉碎性を評価した。試験材は一般廃棄物系の使用済みプラスチックを用いた。1H-NMRによる定量の結果、本試験材の構成は、PE : 31.7%、PP : 22.6%、PS : 17.1%、PET : 13.0%、PVC : 1.6%、その他プラスチック : 14.0%であった。使用済みプラスチックの加熱熔融は2軸押し出し機(スクリー径 : 20mm φ、ダイス径 : 10mm φ、スクリー長さ/スクリー直径(L/D) = 20)を用いて行い、処理温度を180~350℃、使用済みプラスチック供給量を0.50kg/h(滞留時間 : 15min)、0.25kg/h(滞留時間 : 30min) 0.17kg/h(滞留時間 : 45min)の範囲で変化させた。ダイスから排出された熔融プラスチックは空冷し、回収した。

加熱熔融により得られた使用済みプラスチック(滞留時間 : 30min)の断面写真を図6に示す。処理温度が200℃の使用済みプラスチックでは、内部に多くの空孔が存在するとともに未熔融のプラスチックが散見され、熔融混合が不十分である。一方、320℃では空孔が減少するとともに、未熔融のプラスチックが減少しており十分に熔融混合されていることが観察

された。別途測定した使用済みプラスチックの粘度は200℃で3000~5000Pa·s、320℃では400~560Pa·sであり、200℃では未熔融のプラスチックが残存するため粘度が高く、320℃では熔融が進み粘度が低下するため、混合が促進されると推定される。

次に、加熱熔融により得られた使用済みプラスチックの粉碎性を調査した。異なる温度で加熱熔融した使用済みプラスチックを同一の粉碎条件(一軸せん断式粉碎機 : 回転数695rpm、粉碎時間15min)で粉碎し、得られた2mm以下のプラスチック重量から収率を算出した。さらに試料の粒度分布をRosin-Rammler線図により近似し、平均粒径(D50 : 50%通過径)を算出した。平均粒径および2mm以下粒子の収率に及ぼす熔融処理温度の影響を図7に示す。2mm以下の収率は処理温度が高くなるにともない増加する。一方、2mm以下プラスチックの平均粒径は280℃まで処理温度の影響は認められず、280℃以上で平均粒径は大幅に低下した。また、加熱熔融装置内の滞留時間を長くすると平均粒径は低下する傾向を示した。

以上の結果から、使用済みプラスチックの目標粒度に応じた最適粉碎条件を決定することが可能である。

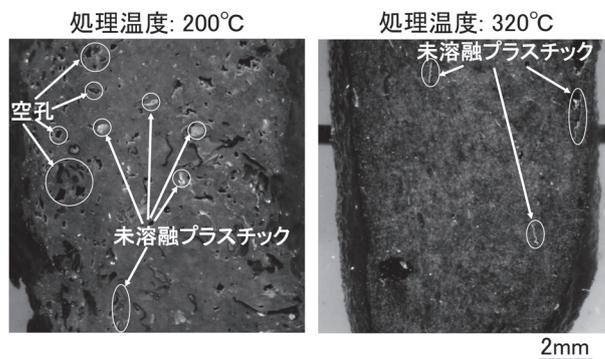


図6 加熱熔融後プラスチックの断面写真

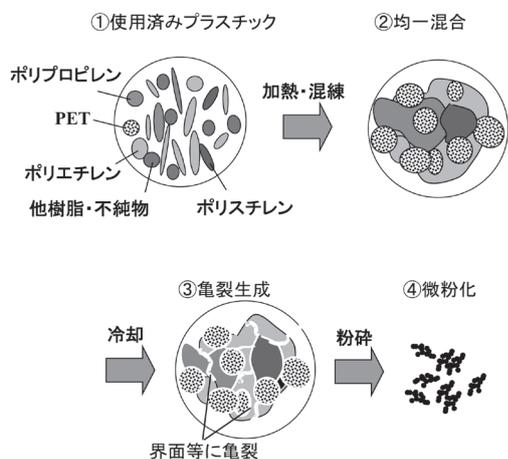


図5 使用済みプラスチックの微粉化概念

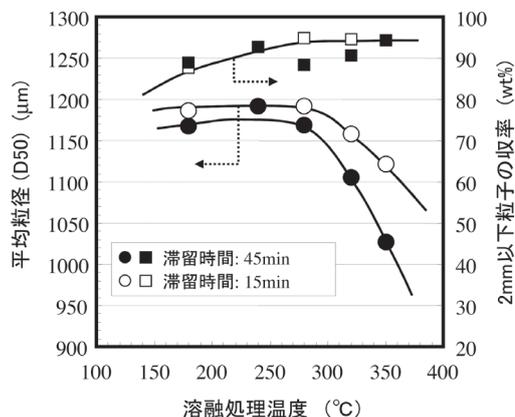


図7 平均粒径および2mm以下粒子収率に及ぼす熔融処理温度の影響

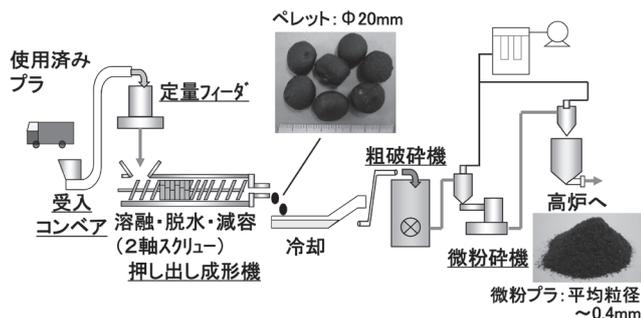


図8 使用済みプラスチックの微粉化プロセスフロー

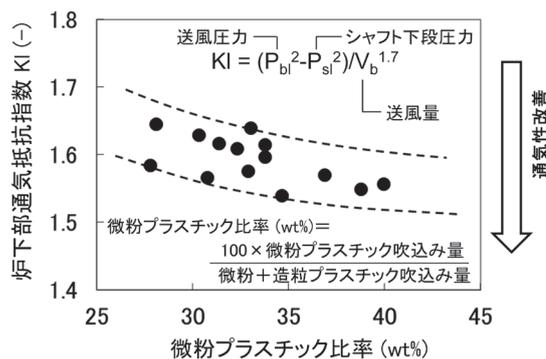


図9 微粉プラスチック比率が炉内通気抵抗に及ぼす影響

2.3 使用済みプラスチック微粉化プロセスの概要

前章で述べた微粉プラスチックを製造するためのプロセスフローを図8に示す。搬入された使用済みプラスチックは、押し出し成形機に定量供給され、電気加熱式のヒーターにより加熱・脱水・溶融し均一に混合される。その後ペレット状(Φ20mm程度)に加工され、水浴中で急冷されると図5の③に示すように異種プラスチックの界面において線膨張率の違いからペレット内部に多数の亀裂が形成される。この状態では比較的小さな外力により微粉砕が可能であるため、粗破砕機・微粉碎機により高炉吹込みに適した粒径(平均粒径で0.4mm程度)にまで容易に粉砕される。

本設備は2007年にJFEスチール東日本製鉄所の京浜地区において8,000トン/年の能力で稼働開始し、その後2012年には能力を2倍の16,000トン/年に増強した。以来、順調に使用済みプラスチックのリサイクルを続けている。

2.4 実高炉への適用効果

微粉プラスチックの使用比率が実高炉(内容積5,000m³)における通気性(炉下部通気抵抗指数: KI値)に及ぼす影響を図9に示す⁸⁾。微粉のプラスチック(平均粒径D50: 0.4mm程度)および造粒プラスチック(Φ6mm×10mm程度)を同時に使用していた時期において、微粉プラスチック比率を使用済みプラスチック使用量(微粉と造粒プラスチックの合計)に対する微粉プラスチック使用量の割合で定義した。通気抵抗指数(KI値)はしばしば高炉の通気性評価に使用される指標であり、炉内の差圧を通過するガス流量で除して算出される⁹⁾。図9から、微粉のプラスチックの比率が大きくなると通気抵抗指数KIも減少(通気性は向上)することが確認された。これは使用済みプラスチックの微粉化によりガス化速度が向上し、炉内への未燃物の供給が減少したことによると推定される。

助となるべく1996年にJFEスチールにおいて使用済みプラスチックのリサイクル(高炉原料化)を開始し、以来、リサイクル量は2014年度までの累積で約65万トンに上っている。2014年度までの使用済みプラスチックのリサイクル量をCO₂の削減量に換算すれば約180万トンに相当し、環境負荷の軽減に役立っている³⁾。今後も、製鉄所内の高温プロセスを利用したリサイクル技術を通じて持続可能社会の構築に向けて貢献して行きたい。

参考文献

- 1) 林敏, 鈴木驍一, 小林正: 鉄と鋼, 49 (1963) 4, 655.
- 2) 川辺正行, 和栗真次郎, 馬場昌喜, 石川泰, 長谷川晟: 鉄と鋼, 68 (1982) 15, 2393.
- 3) プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討, 日本容器包装リサイクル協会, (平成19年6月), 20.
- 4) プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況, プラスチック循環利用協会, (平成26年12月), 2.
- 5) 根本謙一, 家本勅, 関根真也: 材料と環境, 48 (1999) 2, 61.
- 6) 吉田康夫, 野沢健太郎, 松井良行, 船曳哲史, 峯隆夫: 神戸製鋼技報, 51 (2001) 2, 58.
- 7) 浅沼稔, 梶岡正彦, 鶴田秀和: 日本エネルギー学会誌, 91 (2012) 2, 127.
- 8) R.Murai, M.Asanuma, M.Sato, T.Inoguchi and K.Terada: ISIJ Int.,55 (2015), 528.
- 9) K.Ishii: Advanced Pulverised Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, Pergamon Press, Oxford, (2000), 149.

(2015年5月27日受付)

3 おわりに

循環型社会構築および鉄鋼業からのCO₂排出量削減の一