

日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-16

高炉におけるプラスチック再資源化技術の開発

Development of Waste Plastics Recycling Technology in Blast Furnace

浅沼 稔
Minoru Asanuma

JFE スチール (株) スチール研究所
製鉄・環境プロセス研究部 主任研究員

1 はじめに

わが国の経済は大量生産—大量消費を前提にした社会システムにより着実な発展を遂げ、人類はその恩恵を享受してきた。しかしながら、大量生産により生み出された製品はワンウェイを基本としたため、廃棄物の発生量は増大の一途をたどり、埋め立て処分場の枯渇や焼却場での環境問題の発生など大きな社会問題を招いた。また、急激な経済発展に伴う炭酸ガス排出量増加は、均衡を維持していた地球環境のバランスを崩し、地球温暖化という負債をもたらした。将来の循環型社会へのスムーズな移行を目指すためにはこれら課題の解決が急務であり、日本においては循環型リサイクル社会の構築に向けて各種廃棄物のリサイクルを促進する循環型社会形成基本法が2001年に施行された。また、地球規模においては地球温暖化防止等の環境保全の観点から、「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」が採択され、2005年2月に発効された。

使用済みプラスチックは容積比で廃棄物に占める比率が極めて高く、その大半が埋め立てあるいは焼却処理されていた。これは、回収された使用済みプラスチックは多種多様の種類と形態のものが渾然一体となっているためである。特に広く普及しているポリ塩化ビニルは、その処理方法によっては毒性の高いダイオキシンを発生したり、腐食性の強い塩酸を発生させ設備破損を起こすなど、工業的に再利用する方法が極めて困難な事に起因している。その排出量は1990年以降、前年度比5%を超える勢いで増加したが、2000年以降は約1000万トンで推移している¹⁾。これは容器包装リサイクル法の整備と環境問題への関心の高まりによるものと推定される。

一方、日本の鉄鋼業は世界最高のエネルギー効率を達成しているものの、鉄鋼業はエネルギー多消費型の産業であり、日本における最終エネルギー消費の約11%を占めるとも

に184.7百万トン(2004年度)の炭酸ガスを排出している²⁾。また、鉄鋼業はその原燃料のほとんどを海外に依存し、年間約2億トンもの膨大な資源を輸入している。以上のことを踏まえ、日本鉄鋼連盟では2010年度において1990年度基準で10.5%(このうち1.5%は集荷システムの整備等を前提とした高炉等における廃プラスチック等の利用)の炭酸ガス排出量削減の自主行動計画を策定し、これに則って鉄鋼各社は種々の省エネ・炭酸ガス削減技術に取り組んでいる。ベースロードである操業改善や省エネ技術の開発はもちろん重要であるが、種々の廃棄物の鉄鋼プロセスでの利用も炭酸ガス削減の重要なアイテムであり、鉄鋼業が周辺社会と共存していくためには必要不可欠な取り組みである。

JFE スチール(株)は、以前よりこの使用済みプラスチックの高炉における還元材としての利用に着目して技術開発を進め、いち早くその工業的再利用システムを完成させた。1996年10月に産業廃棄物系プラスチックのリサイクルを開始し、2000年4月からは容器包装プラスチックのリサイクルを開始した。本報告ではその開発の経緯、高炉原料化プロセスの概要を紹介する。

2 研究開発の背景

2.1 使用済みプラスチックの社会的問題

プラスチックは基礎素材としての多くの優れた特性から、様々な分野で幅広く使用されている反面、廃棄されるプラスチックは複数のプラスチックあるいは他の素材との複合材・混合物であり、分離・分別することが難しい。そのため、1995年当時でのリサイクル率は25%であり、スチール缶(74%)³⁾、アルミ缶(66%)⁴⁾などに比較して低レベルであった。

使用済みプラスチックのリサイクルに関しては、1970年代に省資源を目的とした油化技術の開発が進められ、1990

年代になって環境保全も重視した循環社会の構築に向けての技術開発が指向されるようになった⁵⁾。使用済みプラスチックの油化は液体燃料等にすることでナフサ代替など石油化学原料として再利用する方法である。油化プロセスは油化不適物（鉄、非鉄、PET ボトルなど）を除去する前処理工程、油に変換する熱分解工程と、生成油を市販品と同等の品質にする改質・精製工程に大別される。このように複数の工程を配置するために、使用済みプラスチックの処理コストは高くなるとともに、製造した油の用途にも限界がある。そのため、大量処理が可能で、資源有効利用率が高く、経済的なリサイクル方法が要望されていた。

2.2 開発の経緯

JFE スチール（株）は1972年に合成樹脂を高炉の還元材として使用する基本特許⁶⁾を出願し、権利を取得したが、廃プラスチックの効率的回収システムの社会基盤が整っていなかったことから、詳細研究による実用化技術開発は見送られてきた。1990年代に入り、省資源、省エネの機運が高まり、再度廃プラスチックの利用について検討した。高炉でプラスチックを利用する方法としては、①高炉上部から鉄鉱石およびコークスと同時に装入する方法、②高炉下部羽口から熱風とともに吹込む方法、が考えられる。

高炉上部から装入する方法については、プラスチックは原料の降下とともに昇温し、300℃以上でタール成分を含む炭化水素類に分解し、高炉上部から排出されることから、コークス使用量の削減効果が少ない、高炉内の通気性阻害を誘発する、高炉ガス除塵設備へのタール付着などの設備上のトラブルを誘発する、との結論を得た。従って、プラスチックを高効率でリサイクルするために、高炉下部羽口から直接高炉に吹込み鉄鉱石の還元材として利用する方法を検討した。

高炉への廃プラスチック吹込みに関しては、1993年にポリ塩化ビニルの使用割合の低いドイツにおいて、小型高炉で使用した例はあるが、製鉄所外の再資源化工場で再生処理さ

れたプラスチックを利用するものであった⁷⁾。そこで、使用済みプラスチックの効果的な大量再利用を実現し、合わせて高炉操業における更なる省資源、省エネルギーの達成を最終目標として、前処理から高炉利用までの一貫した使用済みプラスチック高炉原料化リサイクルシステムの開発に取り組んだ。

2.3 プラスチック高炉吹込み時の課題

使用済みプラスチックは従来からボイラー用燃料等のサーマルリサイクルとしての利用が知られているが、高炉での利用についての詳細な報告はない。また、高炉内に吹込むプラスチックの最適粒径等の知見も皆無である。一方、前節で述べたように使用済みプラスチックは、形状、種類ともに多岐にわたる。図1には一般廃棄物として排出されたプラスチックの形態、材質別含有率および物性の1例を示す。排出元により、その含有率は異なるが、袋・フィルム類が主体であるために嵩密度は0.1トン/m³以下であり、石炭等に比較して極めて低い。また、排出プラスチック中には加熱により塩化水素を発生するポリ塩化ビニルが含まれており、高炉で利用した場合には設備腐食等が懸念される。従って、使用済みプラスチックを高炉で利用するためには以下の技術開発が必要である。

- (1) プラスチックの高炉内での反応効率を明らかにするための高炉内挙動解析、特に高温域（約2000℃）におけるガス化特性の解明、および使用済みプラスチックの粒径など性状の最適化
 - (2) 物理的、化学的性状の異なるプラスチックの分別・破碎・造粒技術の開発
 - (3) 設備上問題を誘発するポリ塩化ビニルを除去する高性能分離技術の開発
 - (4) 分離されたポリ塩化ビニルの脱塩素技術の開発
- なお、ここでは(1)～(3)の技術開発内容を報告する。

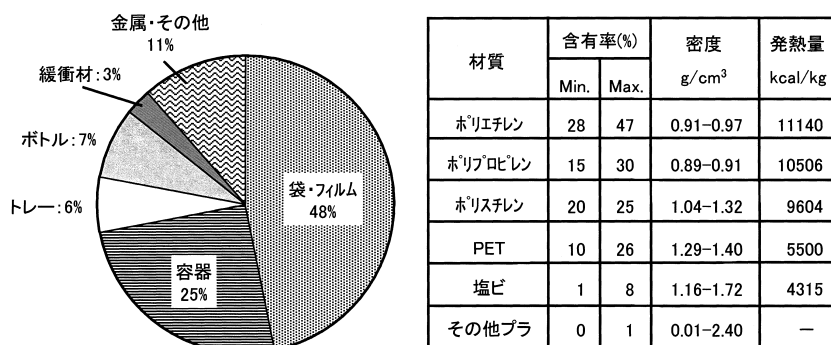


図1 使用済みプラスチック排出形態および性状

3 使用済みプラスチック 高炉原料化技術

3.1 プラスチックの燃焼性評価

プラスチックを高炉で利用する場合、炉内で高いガス化率を達成し、還元材として利用されることが最も重要な課題である。一般に固体粒子は細粒化するほど比表面積が大きくなり、反応速度が上昇するが、プラスチックはその性質上微細化が難しい。そこで、高炉に吹込まれたプラスチックのガス化特性を把握することおよび高効率で利用可能なプラスチック粒子径を選定するために、以下の基礎検討を実施した。

3.1.1 単一粒子の燃焼性評価

プラスチック粒子の基本的な燃焼挙動を評価するために、図2に示す層流炉を用いて検討した。本装置は1000～1300℃に加熱された炉内に、炉上部より予熱ガスとプラスチック粒子を供給し、落下する単一粒子の燃焼過程を石英ガラス窓を通じて高速度カメラにより直接撮影するとともに、高速2色温度計により粒子温度を測定するものである⁸⁾。試験には各種粒度に粉碎・整粒したプラスチックと、比較のために微粉炭の燃焼試験を実施した。

微粉炭（粒径：0.044～0.063 mm）およびプラスチック粒子（粒径：0.425～0.85 mm）を用いた場合の高速度カメラによる単一粒子の画像、高速2色温度計による粒子温度の計測結果を図3に示す。図中に示した時間は着火を基準とした経過時間を示す。微粉炭は炉内に入るとともに瞬時に着火し、揮発分燃焼により粒子火炎温度が1500℃に達する。また、観察される粒子火炎径は急激に拡大し、粒子径は約20倍に達する⁸⁾。続いて、揮発分燃焼が終了するにつれて火炎径は減少し、温度も低下しチャーの表面燃焼に移行する。一方、本試験で用いたプラスチックの粒子径は微粉炭より大きいために、着火が遅く、火炎が観察される状態でも粒子火炎温度は雰囲気温度以上には達しない。また、微粉炭に比較して火炎径の活発な成長は観察されない。

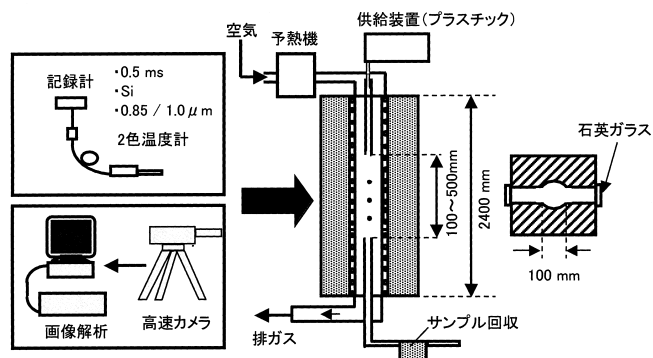


図2 単一粒子燃焼挙動観察用装置（層流炉）

図4にプラスチック粒子径と落下から着火までに要する時間の関係を示す。粒子径が大きくなるほど着火時間を必要とし、プラスチック種類による粒子の着火時間の相違は認められなかった。また、微粉炭に比較してプラスチックでは粒子径の影響が大であり、1 mm以下の粒子の着火時間は微粉炭よりプラスチックの方が早く、1 mm以上ではプラスチックの方が着火時間を要する傾向が認められた。これはプラスチックと微粉炭の粒子内部への熱伝導が異なる、すなわち微粉炭に比較してプラスチックは熱伝導率が高く、粒子表面で得られた熱が速やかに内部に伝熱するためと推測される。

3.1.2 粒子群としての燃焼性評価

単一粒子の燃焼試験では、粒子径が大きくなるに従い、燃焼性が低下することが示唆された。しかしながら、プラスチックは粉碎性が劣ることから微粉化するためには冷却等の操作が必要となり、経済的ではない。実炉での吹込みを考えると粒子群燃焼となり、粒子間の輻射伝熱などもあり単一粒

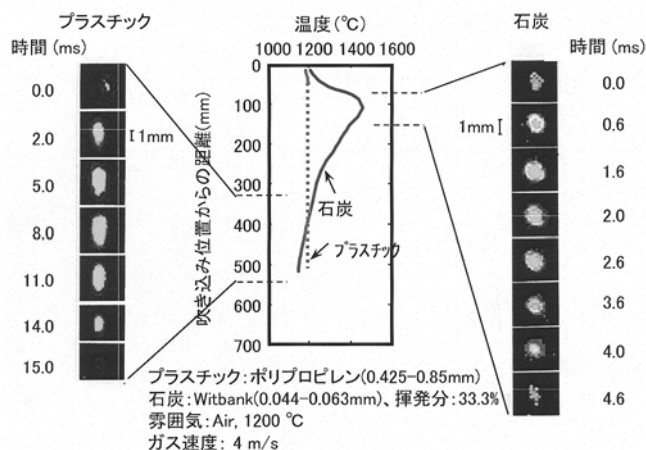


図3 プラスチック単一粒子の燃焼状況

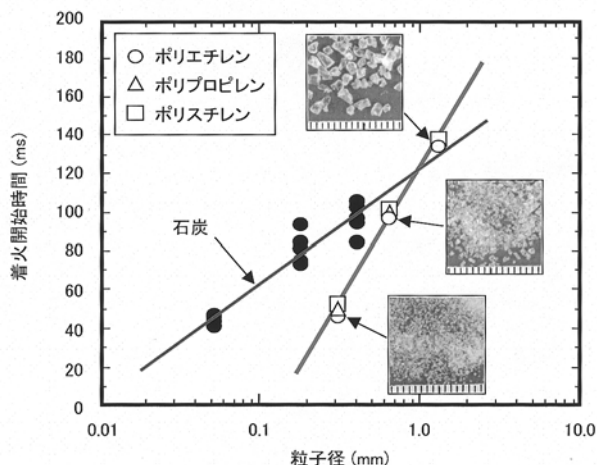


図4 プラスチック単一粒子の着火開始時間

子の燃焼とは異なる。そこで、コークス充填層内における燃焼性を評価するために、10t/dの試験高炉（スクラップ溶解試験炉）を用いてプラスチックの燃焼挙動について検討を行った（図5）⁹⁾。本装置はシャフト型溶解炉で、鉄スクラップの溶解を目的としたものである。炉上部より鉄スクラップ、高炉用コークス等を装入し、羽口部より酸素（窒素で希釈）を送風するとともに微粉炭を吹込み、炉下部より溶銑およびスラグを回収する。高炉下部は2000℃以上の高温となるために、羽口部保護のために羽口に冷却水を通液している。吹込みに用いたプラスチックはポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、ポリスチレン（PS）およびポリエチレン廃材（PLP）、粒径は1mm、2～4mmである。なお、本試験は鉄スクラップの溶解のみであり、鉄鉱石の還元による炭素消費はない。

図6に羽口吹込み燃料（微粉炭＋プラスチック）一定の条件で、各種プラスチックを吹込んだ時の操作推移を示す。1mmのプラスチック吹込み時の結果と比較して、粗粒のプ

ラスチック（PE：2～4mm、PLP：～4mm）、ポリスチレンを吹込んだ時には溶銑温度の上昇が認められた。また、図7にはオールコークス、微粉炭およびプラスチック吹込み操作時の羽口先理論燃焼温度と羽口先冷却水の抜熱量の関係を示す。粗粒プラスチックでは微粉炭および微粒のプラスチック吹込みに比較して羽口冷却水の抜熱量が小さい。これは粗粒プラスチックの燃焼焦点が微粒プラスチックに比べて炉内側に移行したためと推定できる。この傾向は小型燃焼炉の炉内ガス分析結果と一致した¹⁰⁾。さらに、小型燃焼炉試験では粗粒プラスチックほど燃焼・ガス化率が高いとの結果も得られた¹⁰⁾。以上の結果は粗粒のプラスチックにおいても十分に利用可能であることを示唆するものである。

3.1.3 プラスチック吹込み時の実高炉操作への影響調査¹¹⁾

実際の高炉に吹込んだプラスチックの炉内挙動を確認する

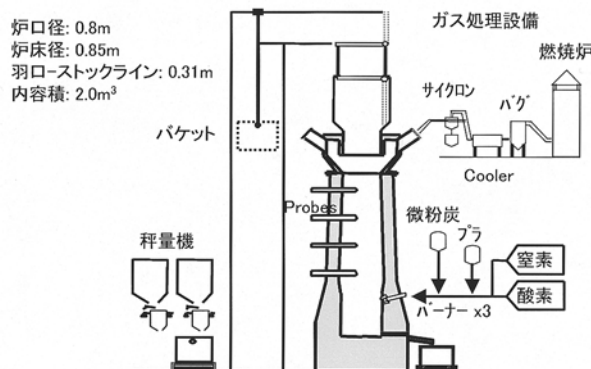


図5 スクラップ溶解試験設備概要

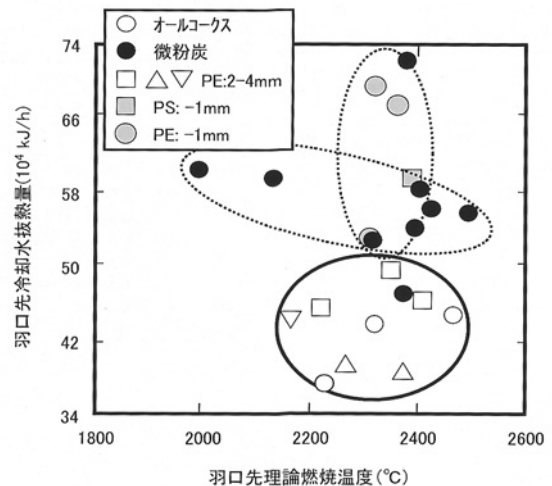


図7 羽口先理論燃焼温度と羽口先冷却水抜熱量

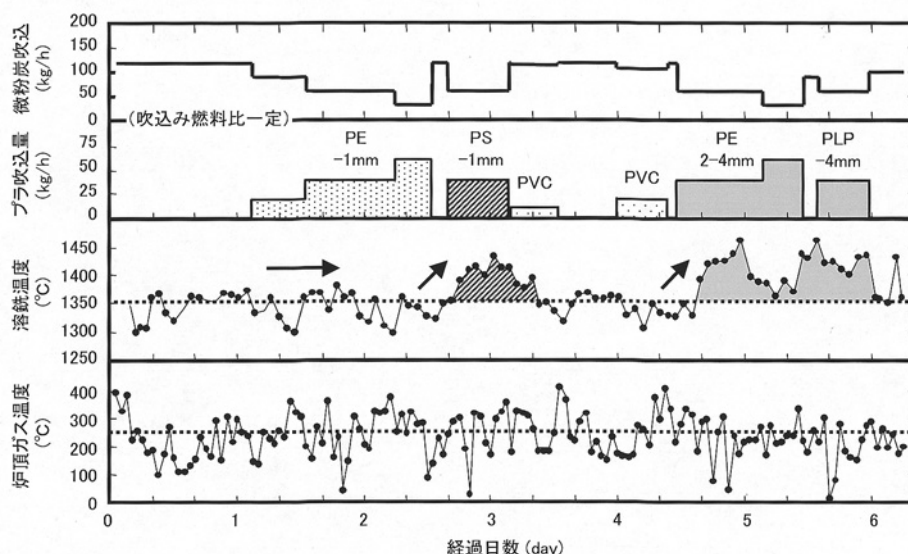


図6 スクラップ溶解試験でのプラスチック吹込み時操作推移

ため、図8に示す試験装置を用い、京浜第1高炉の羽口からプラスチックを吹込む実炉試験を実施した。同図に示す送り込みプローブ（炉内ガス採取管）および以下の方法によりプラスチックの高炉内挙動の解析を行った。なお、プラスチック吹込み量は3万トン/年の条件とした。

- (1) 羽口視窓から高炉内に吹込まれたプラスチックを1/13500秒の撮影速度で撮影し、ガス化状態を解析した。
- (2) 送り込みプローブを高炉内に装入し、高炉内発生ガスを半径方向3箇所（中心、中間、周辺）で分析した。
- (3) 高炉ガス、ダスト分析を実施し、プラスチック分解生成物（軽質炭化水素）およびタールの有無を調査した。

図8に高炉羽口に吹込まれたプラスチック粒子の高速度カメラ撮影写真の解析画像を示す。プラスチックおよび微粉炭粒子は吹込みランスにより、高温空気が流れている羽口管内に気送され、約200 m/sのガス流速で高炉内に送り込まれる。画像の暗い部分は送り込まれた直後の粒子群を、濃い灰色部分はガス化状態を、薄い灰色部分は炉内高温部を、白色は吹込みランスをそれぞれ示す。微粉炭は吹込み直後に燃焼を開始し火炎が観察されるのに対し、粒径の大きいプラスチック粒子は、ガス化速度が遅いためレースウェイ内に粒子として残っていることが観察された。

未燃のプラスチックが存在した場合、タールの生成が懸念されたが、高炉ダスト中タール濃度は通常操業と同程度を示し、プラスチックは高炉内で完全にガス化され、高炉ガス清浄設備には問題がないことが確認された。

また、プラスチックの組成は水素濃度が高く、本試験においては通常操業に比較して、0.3%の水素濃度の増加が認められた。これらは、プラスチックが高炉内でガス化されてい

ることを示唆するとともに、高炉ガスの熱量アップに寄与する。以上の結果より、高炉へのプラスチック吹込みは、操業上問題ないことが確認された。

3.2 プラスチックの事前処理技術¹²⁾

使用済みプラスチックを高炉還元材として利用するためには、高炉への吹込みを可能にする事前処理技術を開発する必要がある。特に、プラスチック製容器包装を高炉原料化の対象品とした場合、①種々雑多な形態から構成されるプラスチック混合物の処理、②プラスチック以外の原料化不適物（異物）の効率的除去、③不可避免的に混入してくる塩素含有物（ポリ塩化ビニル等）を除去する必要がある。

これらを解決するため、処理能力500 kg/hの実証プラントを建設し、事前処理の基礎実験を行った。主な技術概要を以下に示す。なお、処理対象としては家庭などから排出されるプラスチックごみを分別収集・袋詰めしたものを想定した。

3.2.1 使用済みプラスチックの形態別分離技術の開発

使用済みプラスチックの形態は固形状とフィルム状に大別されるが、両者が混合された状態で破碎するとフィルム状プラスチックあるいは破碎物がホッパー内での棚吊りや、配管の閉塞などの原因となる。そのため、事前に両者を分離する技術の開発が必要になった。用いた分離装置の原理を図9に示す。本装置は傾斜したスクリーンに揺動運動を与え、反発力の差を利用して固形とフィルムを分離するものである。

本技術ではスクリーン傾斜角とクランク軸回転数が分離効率に影響する。フィルム系および固形系が各々50%含まれる排出プラスチックを用いた時の試験結果を図9に示す。同

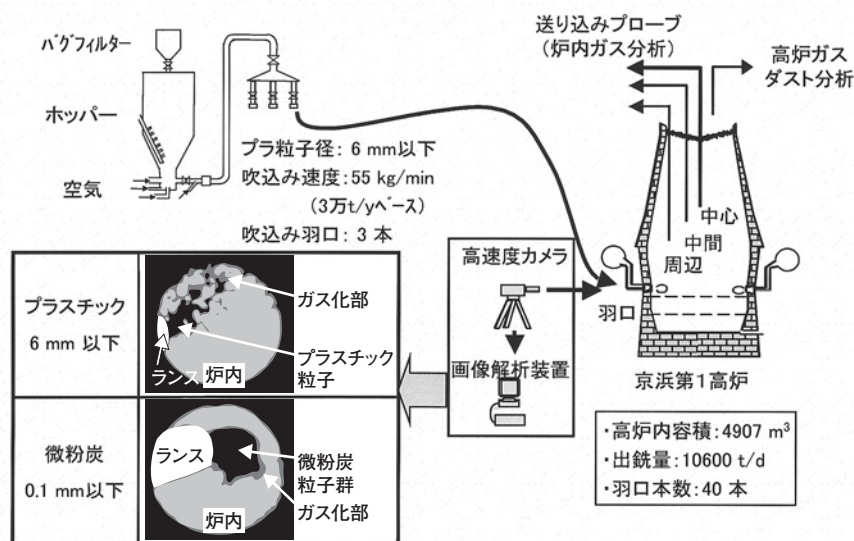


図8 実炉試験でのプラスチック高炉内ガス化挙動の解析

図より、プラスチックの最適分離条件は、傾斜角10度、クランク軸回転数170～180 rpmであることが明らかとなった。

3.2.2 ポリ塩化ビニル分離システムの開発

一般家庭から排出されるプラスチック製廃棄物中には、主にラップ類に代表される塩ビ樹脂類（ポリ塩化ビニル）がフィルム系に混入している。これらを分離せずに高炉還元材として用いると、高炉内で塩化水素が発生し、これは高炉設備の腐食につながる可能性がある。そのため、フィルム系プラスチック中の塩ビ樹脂類を分離する塩ビ分離システムの開発を行った。

図1に示したように塩ビ樹脂類は他の樹脂に比較して比重が大きく、理論的にはその差により分離することが可能であるが、比重差が小さいために付着気泡や汚れなどの影響を受けやすく、シンクフロート法等の単純な比重分離方式は適用できない。そこで、僅かな比重差や付着気泡等の影響を受けにくい、遠心式比重分離方式の装置の適用について検討した。

図10に同装置の概要を示す。水平に置かれた円筒形のドラム内に水などの分離媒体とともに所定の粒径に破碎されたプラスチックが供給される。ドラムは高速回転をしており、供給されたプラスチック類は回転による遠心力を受け、付着した気泡等が除去され、分離媒体との比重差によって速やか比重分離される。比重の重い塩ビ樹脂類は円筒壁面に押し付けられようとして沈降する。一方、その他の軽量プラスチック類はドラム中心部分に形成されるドーナツ状の水面に浮上する。装置内には半径と角度の異なる2種類のスクリーが設置されており、円筒壁面に沈降した、塩ビ樹脂類は重量物排出口に、水面に浮遊している軽量物は軽量物排出口に掻き寄せられ排出される。

処理能力500 kg/hの実験設備を用いて、供給するプラスチックの最適破碎径、分離媒体液との混合濃度、ドラム回転速度と掻き寄せスクリーとの差速の最適化、ドラム内水位の最適化、消泡剤の選定等を行い、適正な運転条件を把握した。実際の一般廃棄物系プラスチックを用いた分離試験結果を図10に示す。重量物中の塩素濃度が5～9%に対して、軽

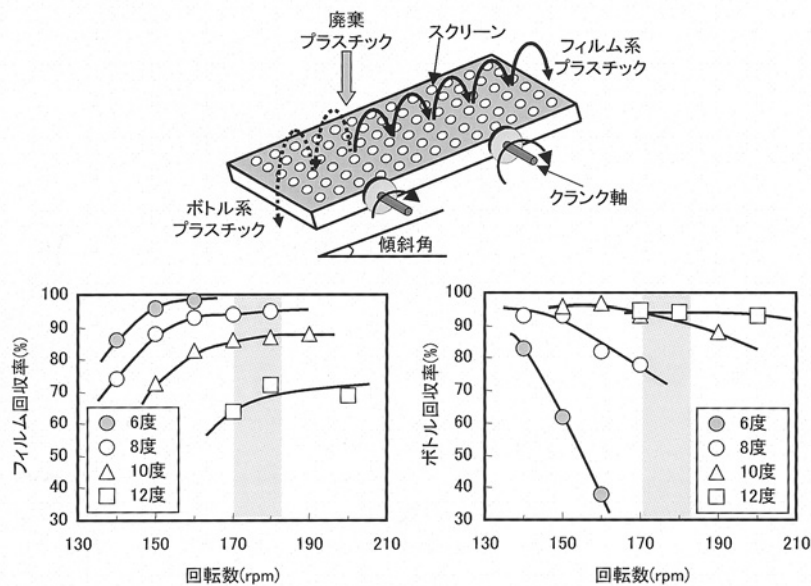


図9 プラスチック形態別分離の原理と試験結果

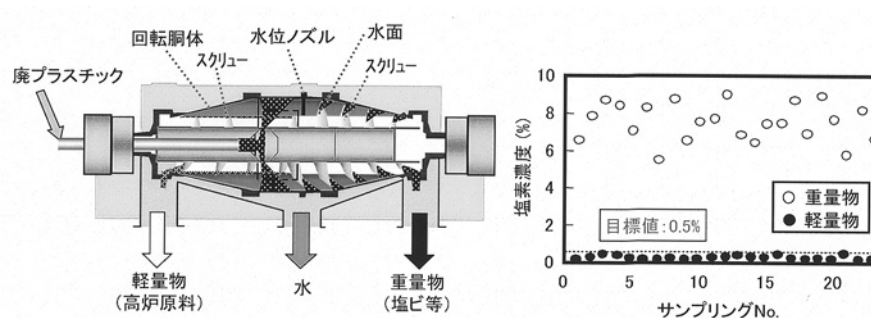


図10 ポリ塩化ビニル分離装置および分離試験結果

量物中の塩素濃度は安定して高炉への吹込みが可能な0.5%以下となっており、高効率で塩ビ樹脂を分離可能であることが立証された。この結果は塩ビ樹脂を含むため一般廃棄物系プラスチックの利用を可能とした。

3.3 使用済みプラスチック高炉原料化設備¹³⁾

以上の要素技術の開発を基に、図11に示す産業系廃プラスチックおよび容器包装プラスチックの高炉原料化技術を確立した。産業系廃プラスチックの場合はある程度性状が明らかであり、ポリ塩化ビニルを除外してフィルム状あるいは固形状のプラスチックを別々に収集可能である。従って、産廃プラスチック高炉原料化設備はフィルムおよび固形プラスチックの2系統で加工される。フィルム系プラスチックは造粒機内で高炉吹込みに適した粒度に造粒される。固形系プラスチックは2軸破碎機、1軸破碎機により破碎され整粒される。2系統で加工された粒子は貯留槽に一旦、溜められた後、吹込みタンクに移送される。さらに吹込みタンクより空気とともに高炉羽口に輸送され、羽口から高炉内に吹込まれる。

一方、容器包装プラスチックはフィルム状あるいは固形状プラスチックが混在した形態（バール状、約1m角）で入荷し、ポリ塩化ビニルが約8～10%混入している。そのため、容器包装プラスチック高炉原料化設備はプラスチックの形態別分離装置、ポリ塩化ビニル除去装置を有する。収集された容器包装プラスチックは解砕処理され、フィルム系と固形系に分離される。後者は破碎機により高炉吹込みに適した粒度に調整され、前者は破碎処理、ポリ塩化ビニル分離、造粒工程により造粒された後、高炉吹込みに使用される。

4 おわりに

JFE スチール（株）は社会的に問題となりつつあった使用済みプラスチックを資源として捉え、1993年より技術開発

を開始し、1995年より鉄鋼業での利用を開始した。本技術が鉄鋼業における廃棄物リサイクルに一石を投じ、他のリサイクル手法の早期技術開発を促進したものと考えられる。2004年までの使用済みプラスチックのリサイクル量累積は既に61万トンに達する。

循環型社会の構築に向けての鉄鋼業の役割は日増しに重要となりつつある。使用済みプラスチックの利用はもちろんのこと、鉄鋼業が保有するポテンシャルを最大限活用することで、周辺社会との共存が図れるものと考えられる。

参考文献

- 1) (社) プラスチック処理促進協会ホームページ：
<http://www.pwmi.or.jp/home.htm>
- 2) (社) 日本鉄鋼連盟ホームページ：<http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/pam/docs/ondankataisaku.pdf>
- 3) スチール缶協会ホームページ：<http://tomcat.rits.or.jp/steelcan/>
- 4) アルミ缶リサイクル協会ホームページ：<http://www.alumi-can.or.jp/>
- 5) 例えば、Kajiyama, R.: Proc. 1st Inter. Symp. on Feedstock Recycling of Plastics, Sendai, DE-2, (1999), 9.
- 6) 宮下恒雄, 西尾浩明, 大関彰一郎：日本国特許第861350
- 7) J. Janz and W. Weiss: Proc. 3rd European Ironmaking Cong., (1996), 114.
- 8) 有山達郎, 山川裕一, 佐藤道貴：鉄と鋼, 81 (1995), 703.
- 9) T. Ariyama, M. Matsuura, H. Noda, M. Asanuma, T. Shikada, R. Murai, H. Nakamura and T. Sumigama: ISIJ Int., 37 (1997), 977.

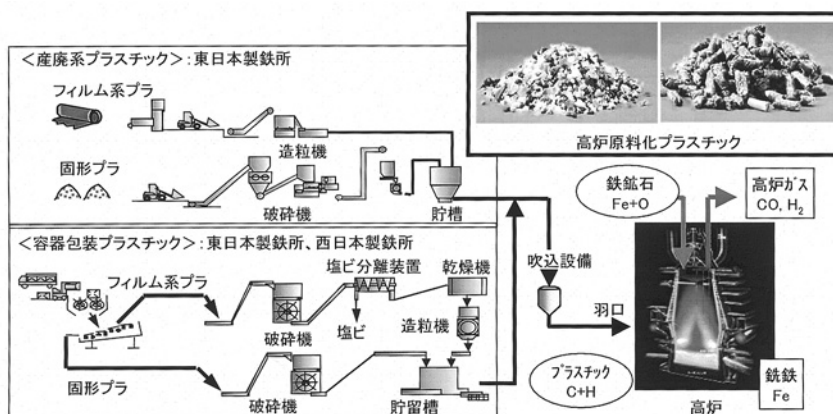


図11 使用済みプラスチック高炉原料化フロー

- 10) M. Asanuma, T. Ariyama, M. Sato, R. Murai, T. Nonaka, I. Okochi, H. Tsukiji and K. Nemoto : ISIJ Int., 40 (2000), 244.
- 11) 浅沼稔, 有山達郎, 山田裕, 藤井益弘, 大河内巖, 炭竈隆志, 徳田昌則: 日本エネルギー学会誌, 77 (1998), 423.
- 12) 大垣陽二, 秋保慶志, 宅和稔朗, 山崎茂樹, 立福輝生, 浅野幹之: NKK技報, 164 (1998), 37.
- 13) 大垣陽二, 富岡浩一, 渡辺厚, 有田耕二, 栗山一郎, 菅昌徹朗: NKK技報, 169 (2000), 1.

(2006年8月18日受付)