

高炉への廃プラスチック吹込み技術の高度化

Advanced Recycling Technology of Waste Plastics in Blast Furnace

浅沼 稔	ASANUMA Minoru	JFE スチール	スチール研究所	環境プロセス研究部	主任研究員(課長)
梶岡 正彦	KAJIOKA Masahiko	JFE スチール	スチール研究所	製鉄研究部	主任研究員(副部長)
桑原 稔	KUWABARA Minoru	JFE スチール	東日本製鉄所(京浜)	製鉄部	主任部員(副課長)
福本 泰洋	FUKUMOTO Yasuhiro	JFE スチール	西日本製鉄所(福山)	製鉄部	主任部員(副課長)
寺田 周雄	TERADA Kaneo	JFE スチール	資源循環推進部	主任部員(課長)	

要旨

廃プラスチックのリサイクル技術の確立は地球環境保全および資源リサイクルの観点から極めて重要な課題である。廃プラスチックを高炉吹込み還元材として有効に利用するため、ホットモデル燃焼実験によりその燃焼・ガス化挙動について検討を行った。これら基礎的な知見をもとに、粗粒プラスチックの燃焼性改善のための微粉炭または／および天然ガスとの同時吹込み技術の開発、さらに燃焼・ガス化率向上と炉内通気性改善のためのCaCO₃と廃プラスチックを複合的に造粒する技術を開発した。また、新規なアイデアに基づく廃プラスチックの微粉碎技術についても検討し、実機化を図った。これら技術は、廃プラスチック高炉原料化技術として実高炉に適用されている。

Abstract:

The establishment of technology for recycling waste plastics is a highly important issue for global environmental conservation and the society. JFE Steel has pursued the effective use of waste plastics as a reducing agent for injection into blast furnaces, and conducted hot model experiments to study the combustion and gasification behaviour of waste plastics. On the basis of this basic investigation, advanced technologies that can further improve the combustion and gasification efficiency of waste plastics even with low strength has been developed; i.e. in order to improve combustibility of fine waste plastics, technology for simultaneous injection of such plastics with pulverized coal and/or natural gas has been developed. For improved the strength of plastics, technology for combined agglomeration of waste plastics with CaCO₃ has been developed. In addition, technology for fine crushing of waste plastics has been studied on the basis of new ideas, and this technology has been applied in actual plant operation. These technologies have been successfully applied in actual blast furnaces, contributing to lowering the reducing agent rate.

1. はじめに

1990年代より地球規模でのCO₂などによる地球温暖化が顕在化し、温室効果ガスによる地球規模での温度上昇とその影響などの詳細な将来予測がIPCCにより報告された¹⁾。そのため、地球規模でのCO₂排出量削減を目的とした京都議定書が2005年に発効され、締結した先進国全体で2008~2012年の5年間平均で1990年比に対して少なくとも5%のCO₂排出量削減を定めた。日本は同議定書に基づき6%のCO₂削減目標を約束した。しかしながら、昨今

の中国をはじめとするBRICs諸国の目覚ましい経済成長がCO₂排出量をますます増加させ、さらなる抜本的なCO₂排出量削減が必要となってきた。2008年7月のG8(洞爺湖サミット)において2013年以降の削減目標が議論され、2050年までに半減との目標を共有した。

一方、資源の海外依存率の高い日本においては廃棄物の再資源化・有効利用が緊急の課題である。そのため、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、その1つとして使用済みプラスチックの処理を促進する目的で、一般廃棄物系の容器包装プラスチックの再商品化に関する法律(容り法)が2000年に全面施行された。法律施行の効果が現れ、1999年における使用済みプラスチック

2008年7月25日受付

(以降、廃プラ)の有効利用率が46%であったものが、2006年には72%にも向上している²⁾。

産業界においても、地球温暖化の問題を真剣にとらえ、各業界においてCO₂排出量削減やエネルギー使用量削減の施策あるいは自主行動計画を打ち出している。エネルギー多消費産業である鉄鋼業は地球温暖化防止対策の自主行動計画として、2008~2012年の平均におけるエネルギー消費量を1990年比10%削減する目標を掲げている(粗鋼生産量1億トンを前提)。また付加的に廃プラの集荷システムの確立を前提に100万トンの廃プラ使用を見込んでいる。したがって、廃プラのリサイクル技術を確認していくことは、我が国の社会のみならず地球環境保全にとっても極めて重要な課題といえる。

JFE スチールではその法律施行に先立ち、1996年より産業廃棄物プラスチックの高炉原料化を、2000年には容り法対応の使用済みプラスチック高炉原料化事業を実施している^{3,4)}。容り法対応高炉原料化事業開始よりすでに8年経過し、累積でのリサイクル量は約48万トン(2000年~2007年)に達している。稼働当初は種々の課題もあり、プロセス改善を実施した。現状、高炉で使用している廃プラは10mm以下の粗粒に破碎処理および造粒処理したもので、レースウェイ内での機能を利用して、その滞留効果により還元ガスに変換するものであるが、廃プラ由来のash成分による高炉内圧損上昇(通気性悪化)などの課題も明らかとなった。また、昨今の高炉での高生産性(高出鉄比)、CO₂排出量削減の観点からの低還元材比操業においては、より廃プラの燃焼・ガス化効率を向上させる必要がある。今後、吹込み量の増大を図りつつ、安定した高炉操業を継続していくためには、さらに燃焼性を強化する先進的な技術開発が必要と思われる。この観点から当社では、廃プラと微粉炭あるいは天然ガスとの同時吹込み技術、固体骨材を利用した複合造粒技術⁵⁾、微粉碎廃プラの製造技術についての開発を積極的に推進してきている。

本稿ではまず、廃プラの基本的な燃焼・ガス化特性に関する知見、並びに燃焼・ガス化性を改善するために実施した各種技術開発内容について述べ、最後に廃プラの燃焼性を抜本的に改善した結果について述べる。

2. 既存廃プラスチックの燃焼性向上

2.1 微粉炭、天然ガス混合吹込みの検討

高炉に吹き込まれている廃プラ粒子の外観を写真1に示す。この写真のとおり固形プラスチックを破碎処理したものとフィルム状プラスチックを造粒処理したものであり、従来使用されている微粉炭に比較して、重量当たりの比表面積は小さく、緻密な構造である。高温場での廃プラの燃焼形態は表面燃焼と推定され³⁾、廃プラの燃焼性を高めるためには、より燃焼速度の速いものを助燃剤として添加し

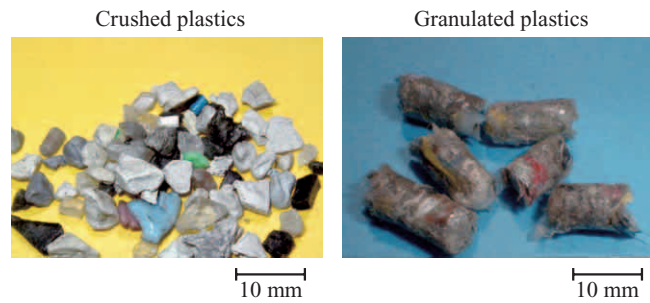


写真1 高炉原料化プラスチック外観
Photo 1 Appearance of waste plastics

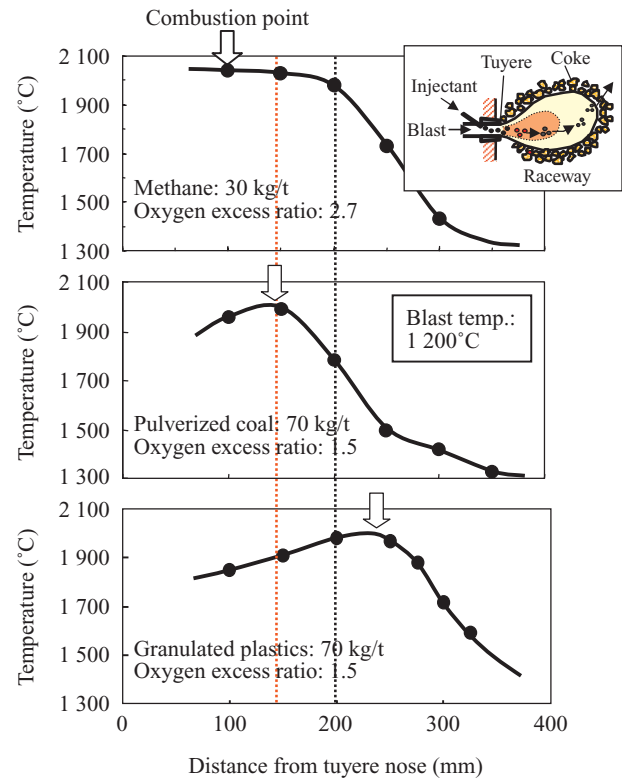


図1 微粉炭、メタン、廃プラ吹込み時のレースウェイ内温度分布

Fig.1 Temperature change in raceway on injection of PC, CH₄ and waste plastics

た方が望ましい。これを実現する手段として、廃プラよりも燃焼速度の速い、微粉炭や天然ガスの助燃効果を活用することが有効と考えられる。図1には高炉下部を模擬したコークス充填層(ホットモデル実験装置)³⁾に微粉炭、メタン(天然ガスを模擬)、廃プラを単独で吹き込んだ時のレースウェイ内温度分布を示す。最高温度位置が吹込み位置に近いほど、燃焼が速いことを示し、同図に見られるようにメタンが最も燃焼が速く、微粉炭、廃プラの序列となる。

そこでまず、微粉炭混合の効果について検討した。上述のホットモデル試験装置を用いて、廃プラと微粉炭の混合方法を変えた場合の試験結果を図2に示す。Case 1は廃プラと微粉炭を別々のランスより吹き込んだ場合、Case 2は配管内で混合して吹き込んだ場合の結果である。Case 2は

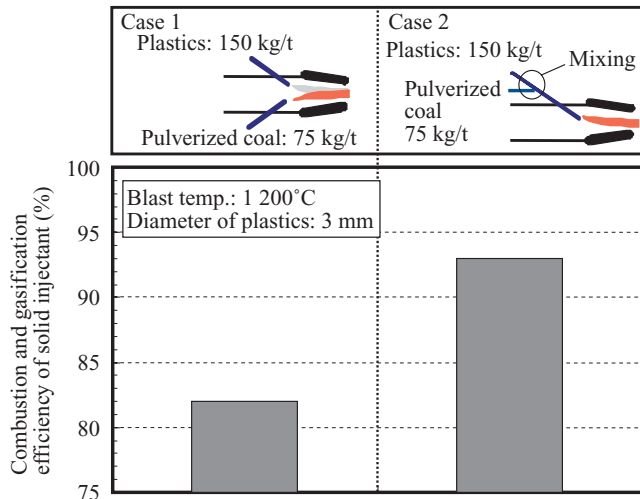


図2 固体補助還元材同時吹込みの効果

Fig.2 Effect of simultaneous injection on combustion and gasification efficiency of solid injectants

Case 1 に比較して、約 10% の燃焼・ガス化率の向上が認められた。これは燃焼速度の速い微粉炭により廃プラの燃焼・ガス化速度の促進されたものと推察される。図 3 には 120 m/s の気流中に吹き込まれたプラスチック、微粉炭粒

子の速度変化を示す。両粒子とも気流により加速するが、プラスチック粒子の速度増加は粒子が大きいため、微粉炭に比較して遅い。これは高炉下部のレースウェイ内滞留時間を示唆し、廃プラは微粉炭に比較して滞留時間が長く、その点では燃焼に有利であることを示す。一方、配管混合後の廃プラ粒子表面は図 3 に示したように微粉炭の付着が認められ、微粉炭の燃焼熱が直接プラスチックに供給され、プラスチックの燃焼・ガス化が促進されたことを示唆する。また、その付着により、微粉炭の高温場での滞留時間が増加し、微粉炭の燃焼性も改善されたと考えられる。

次に、廃プラと微粉炭および天然ガスの同時吹込みの効果を検討した。廃プラとしては造粒プラスチック（ただし、調和平均径は約 4 mm）を用いた。ブローパイプにランスを 2 本挿入し、片側から造粒プラスチックと微粉炭の混合物を、一方から天然ガスを模擬したメタンガスを吹き込んだ。造粒プラスチックと微粉炭はランスの上流側において配管内で混合した。実験条件を表 1 に示す。各吹込み条件において、送風温度および羽口先風速は一定とした。また、断熱理論燃焼温度が一定となるように酸素富化率を調整した。

図 4 に酸素過剰率（送風中の酸素量と吹込み還元材を完

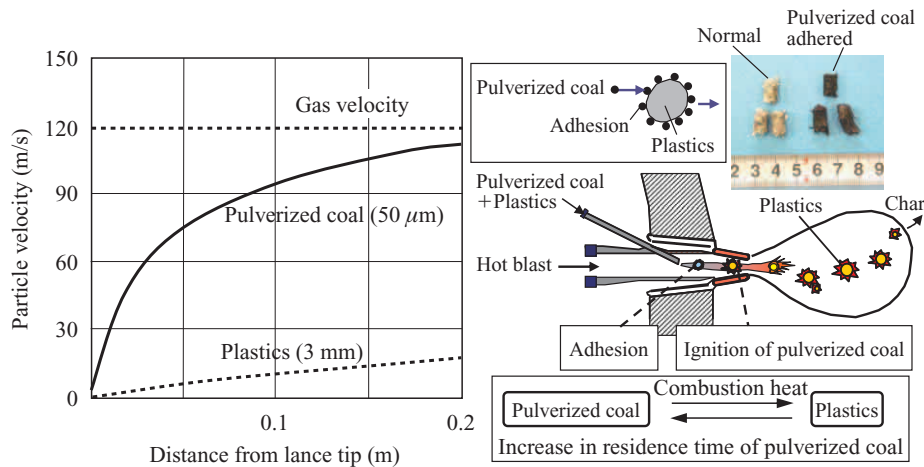


図3 燃焼ガス化率向上のメカニズム

Fig.3 Mechanism of increase in combustion and gasification efficiency

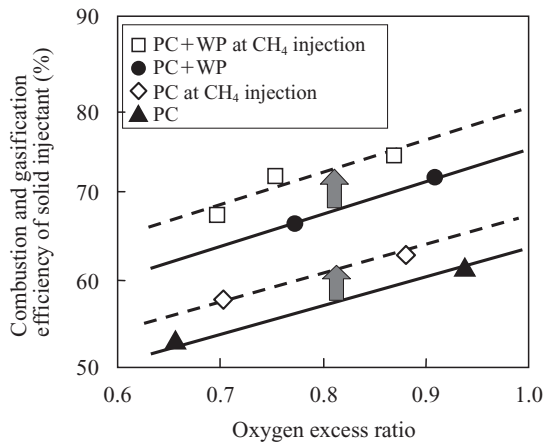
表 1 レースウェイホットモデル実験条件

Table 1 Experimental conditions of raceway hot model

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
PCR (kg/t)	100	100	130	130	70	100	130	160	190
WPR (kg/t)	30	30	30	30	30	—	—	—	—
CH ₄ , R (kg/t)	—	30	—	30	30	30	—	30	—
O ₂ enr. (%)	1.0	4.0	2.0	6.0	3.0	3.0	3.0	6.0	3.0
Blast Temperature (°C)	1200								
V _{tuy} (m/s)	150								
Ex. O ₂	0.91	0.75	0.77	0.70	0.87	0.88	0.94	0.70	0.66

Theoretical flame temperature (TFT): Constant

PCR: Pulverized coal rate WPR: Waste plastics rate CH₄, R: Methane rate O₂ enr.: Enrichment Ex. O₂: Excess O₂ ratio



Blast temperature: 1 200°C Waste plastics: 30 kg/t
Methane rate: 30 kg/t Pulverized coal rate: 70-190 kg/t
Theoretical flame temperature: Constant

図4 固体補助還元材燃焼ガス化率へのメタン吹込みの効果
Fig. 4 Effect of methane gas injection on combustion efficiency of solid injectants

全燃焼させるために必要な必要酸素量との比)と燃焼・ガス化率の関係を示す。メタンの同時吹込みにより、固体還元材(微粉炭、廃プラ)のトータルの燃焼・ガス化率が上昇した。メタンは前述したように燃焼速度が極めて速く、高温場を形成し、微粉炭および廃プラの燃焼ガス化を促進したためと推定される。

本結果は上述のメカニズムにより、微粉炭、廃プラ両方の燃焼が促進された効果によるものと考えられる。すなわち、微粉炭は廃プラ表面に付着し、一緒に飛翔運動することで、燃焼熱を廃プラに有効に伝えることが期待される。天然ガスは急激な燃焼により高温場を形成するので、廃プラ自体の燃焼速度を向上させる。

本結果に基づき、廃プラと微粉炭および天然ガスの同時吹込み操作を実施中である。

2.2 CaCO₃ 添加による造粒プラスチックの改善

現状の廃プラ高炉原料化技術は10 mm以下に破碎あるいは造粒処理したものを使用している。粗粒プラスチックは燃焼性に劣るが、高炉レースウェイ内での循環滞留燃焼により、燃焼・ガス化率を稼いでいる。循環燃焼を考慮した場合、造粒プラスチックの強度が重要となり、強度が弱い造粒プラスチックでは輸送過程あるいは燃焼過程にて粉化(細粒化)しやすく、燃焼・ガス化率を低下させる要因となることが基礎試験の知見として得られている³⁾。また、廃プラ中のash成分は滓化しにくく(高融点:約1750°C)、高炉内の圧損上昇をもたらす。そのため、今後とも廃プラの利用を拡大していくには、粉化しにくい造粒プラスチックを製造し(強度改善)し、燃焼・ガス化率を向上させるとともに廃プラ中ashの滓化促進(通気性改善)を進める必要がある。この手段として、廃プラ造粒時に骨材とともに造粒する、いわゆる複合造粒が有効と考えられる。この

骨材として、CaCO₃に着目した。CaCO₃はレースウェイシェルと同化し、シェルの融点を下げる効果も合わせ持つためである⁵⁾。

写真2には、廃プラにCaCO₃を3wt%添加し、押し出し造粒機で複合造粒した粒子の断面写真と、EPMAでCa原子の分布を測定した結果を示す。本図より、造粒物の空隙はCaCO₃で十分に充填されていることが分かる。また、CaCO₃を3~5wt%添加した試料は、圧縮強度指数 σ (造粒後粒子の硬さを示す指数)が98から245 N/mmへと2倍以上に向上することが確認された。

CaCO₃を3~5wt%含む複合造粒プラスチックを用い、ホットモデル実験を実施した。結果を図5に示す。本図は調和平均径、平均強度指数 σ 、ならびに燃焼・ガス化率 η 間の関係を図示したものである。本図より、全体的な傾向として、調和平均径および平均強度指数がともに高い領域において、明らかに燃焼・ガス化率 η が高いことが分かる。本実験における複合造粒プラスチックに関しても同様に、強度が向上した結果、 η も向上したと捉えることができる。

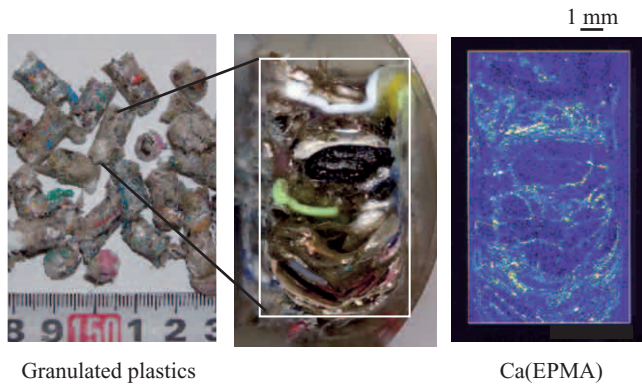


写真2 CaCO₃複合造粒プラスチックの外観および断面写真
Photo 2 Appearance of combined agglomeration of waste plastics with CaCO₃

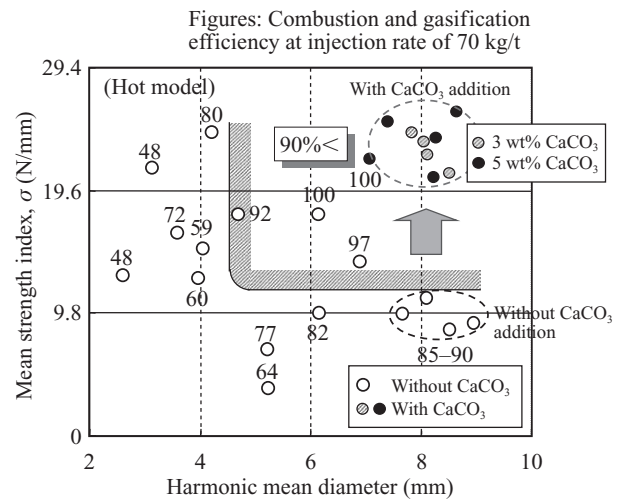
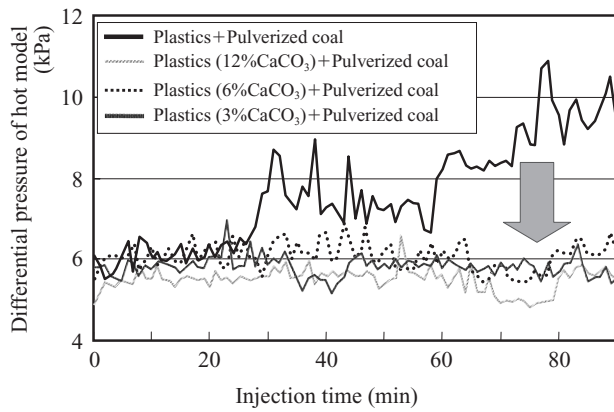


図5 調和平均径、粒子強度と燃焼ガス化率の関係
Fig. 5 Relationship among harmonic mean diameter, mean strength index and combustibility



Blast temperature: 1 200°C O₂ enrichment: 3%
Plastics rate: 70 kg/t-p Pulverized coal rate: 70 kg/t-p
図6 レースウェイホットモデル試験における炉内圧損の経時変化

Fig.6 Change in blast pressure of raceway hot model experiment

したがって、図のハッチングした領域に示すように、平均粒径が約 4.5 mm 以上、かつ σ が 118 N/mm 以上の廃プラを用いることにより、90%以上の燃焼・ガス化率が確保できるものと考えられる。

図6にはホットモデル試験での CaCO₃ 添加造粒プラスチックと微粉炭吹込みの経過時間と送風圧力の関係を示す。なお、本試験装置は高炉下部（送風条件など）を模擬しているが、溶銑・スラグの滴下はなく、炉内圧損上昇などが顕著に現れる。同図に示した通常の造粒プラスチックの場合、経過時間にもない、送風圧力が上昇する。一方、CaCO₃ 添加造粒プラスチック（3%~12%）の場合、送風圧力の上昇は見られなかった。また、試験終了後のシェルを採取し、X線回折測定を実施した結果、通常の造粒プラスチックでは Mullite (3Al₂O₃ · 2SiO₂) であったものが、CaCO₃ 添加では低融点スラグである Anorthite (CaO · Al₂O₃ · 2SiO₂) となっており、Ca が同化していることが観察された。以上の結果から、プラスチックに添加した CaCO₃ が滓化・低融点化を促進し、炉内圧損が軽減されたものと推察される。

本技術は西日本製鉄所の福山3高炉に適用され、コークス比の削減や、炉下部通気性の改善に大きく寄与している⁶⁾。

3. 廃プラスチック微粉化技術開発

近年の高生産（高出銑比）、低還元材比操業においては、従来にも増して羽口より吹き込む補助還元剤の利用が重要である。補助還元材としては、より燃焼速度の速いものが望まれる。造粒プラスチックは粗粒が故に低比表面積で、燃焼速度が微粉炭に比べて遅いが、その分をレースウェイ機能が補足しているといえる。廃プラの燃焼速度を向上さ

せるためには、廃プラを微粉化する必要がある。微粉のプラスチックは粗粒プラスチックのような循環滞留燃焼は期待できず、レースウェイ内での1パス燃焼であり、その燃焼・ガス化率は燃焼速度に依存する。したがって、適正な粒径に廃プラを微粉化する技術が必要となる。以上のことを踏まえ、従来困難であった廃プラの微粉化に取り組み、高炉原料化について検討を行った。

3.1 廃プラスチックの微粉化の考え方と燃焼性

単一あるいは混合プラスチックを粉砕する場合、通常粉砕によるエネルギーにより、プラスチック自身の温度が上昇し、軟化溶解してしまい微粉化が困難であった。そのため、従来冷却による粉砕が一般的である。しかしながら、図7に示すように性質の異なるプラスチックを微細に溶融混合し、常温まで冷却すれば、そのプラスチック間の界面

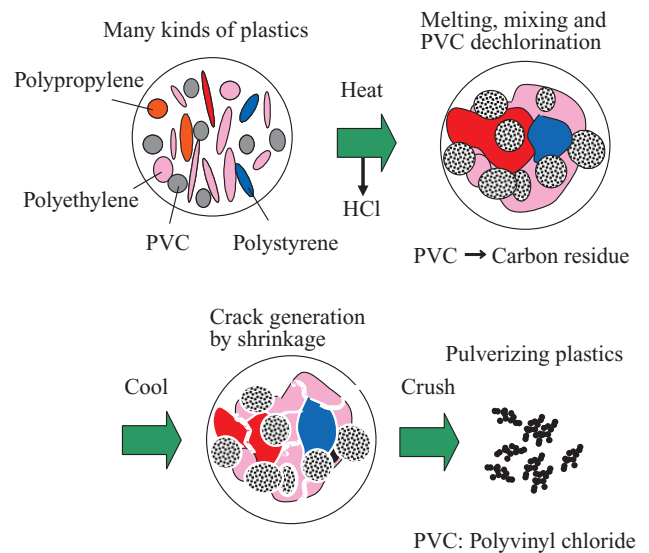


図7 プラスチック微粉砕の考え方

Fig.7 Concept of waste plastics pulverizing

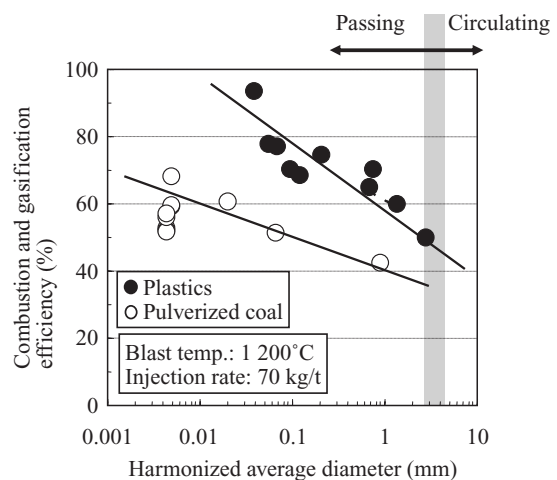


図8 調和平均径と燃焼ガス化率の関係

Fig.8 Effect of particle diameter on combustion and gasification efficiency of plastics

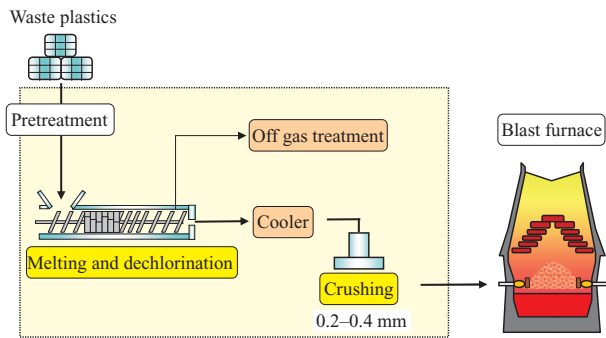


図9 廃プラスチック微粉碎プロセス

Fig.9 Advanced plastics recycling process (APR)

に応力が発生し、脆弱化する現象が基礎実験より見出された。したがって、従来使用している粉碎機においても常温で微粉とすることが可能と考えられる。

より微粉にすれば、燃焼性の観点からは有利であるが、ハンドリングの点より適正な粒度が存在する。粉碎後粒度として、微粉炭と同等の燃焼性（燃焼率、燃焼速度）を指標とした。図8には調和平均径と燃焼ガス化率の関係を示す。同一粒径であれば、微粉炭に比較して10%程度高い燃焼・ガス化率が得られた。したがって、通常使用されている微粉炭と同等の燃焼性を示すプラスチックの調和平均径は、図8より0.2~0.4 mm程度と推定される。

3.2 廃プラスチック微粉化プロセス

燃焼性などの基礎検討結果から、図9に示すフローの廃プラ微粉化プロセスをJFEスチール東日本製鉄所（京浜地区）に2007年3月に建設した。同設備は廃プラの溶融混合、脱塩素、粉碎工程からなり、年間8000tの微粉プラスチック（平均粒径0.2~0.4 mm）を製造する。現在、順調に稼働し、高炉還元材の低減に寄与している。

4. おわりに

細粒、低強度の造粒プラスチックの燃焼・ガス化率を向上させるため、下記の技術開発を実施し、あらゆる性状の廃プラを対象としたadvancedなりサイクル技術を完成させた。

- (1) CaCO₃との複合造粒による廃プラ強度向上
 - (2) 微粉炭、天然ガスとの同時吹込みによる廃プラ燃焼性改善
 - (3) 廃プラの微粉碎プロセス（APR process）の開発
- 廃プラをCニュートラルな材料と見なすと、CO₂発生量削減への効果は大きく、今後とも廃プラ使用量の拡大に注力すべきである。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ. <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>. IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向要約.
- 2) 社団法人プラスチック処理促進協会. <http://www.pwmi.or.jp/flow/flame04.htm>.
- 3) Asanuma, M.; Ariyama, T.; Sato, M.; Murai, R.; Nonaka, T.; Okochi, I.; Tsukiji, H.; Nemoto, K. ISIJ Int. 2000, vol. 40, p. 244.
- 4) 浅沼稔, 有山達郎. 日本エネルギー学会誌. 2004, vol. 83, p. 252.
- 5) Murai, R.; Asanuma, M.; Kashiwara, Y.; Sato, M.; Ariyama, T.; Fukumoto, T.; Sakurai, M. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, p. 97.
- 6) Sato, M.; Asanuma, M.; Murai, R.; Ariyama, T. Proc. ICSTI'06. Osaka. 2006, p. 577.



浅沼 稔



梶岡 正彦



桑原 稔



福本 泰洋



寺田 周雄