

高炉レースウェイ内におけるプラスチックの燃焼・ガス化挙動

浅沼 稔*・有山 達郎*・佐藤 道貴*・村井 亮太*・炭竈 隆志*²

Combustion and Gasification Behaviors of Plastics Injected into Raceway of Blast Furnace

Minoru ASANUMA, Tatsuro ARIYAMA, Michitaka SATO, Ryota MURAI and Takashi SUMIGAMA

Synopsis : The combustion and gasification behaviors of plastics have been investigated with the drop tube furnace, raceway hot model and scrap melting shaft furnace. From the observation of a single plastic combustion by the drop tube furnace experiments under around 1200°C, the burning rate of coarse plastic was slower than that of pulverized coal. On the contrary, in the raceway hot model and scrap melting shaft furnace with the plastics injection, the combustion efficiency of plastics was much higher than that of pulverized coal in spite of coarse particle. Moreover, the gas composition and temperature distribution in the raceway during the plastics injection were similar to those of all coke operation. Thus, it was concluded that the combustion mechanism of coarse plastics was different from that of pulverized coal. On the basis of these results, it was estimated that the residence time of coarse plastics in the raceway was longer than that of pulverized coal or fine particle. The circulation model of coarse plastic particle in the raceway was newly investigated, and the combustion efficiency of plastics was theoretically evaluated. The results calculated by the circulation model agreed with those of the hot model experiments.

Key words : ironmaking ; blast furnace ; plastics injection ; raceway ; plastics combustion.

1. 緒言

プラスチックは加工性、耐久性等に優れ、各種材料に広く使用されている。その原料生産量は近年、約1200万t/年に達している。それに伴い使用済みのシート類、容器などの廃棄物発生量も急増し、一般廃棄物で約420万t/年、産業廃棄物で約340万t/年とされている¹⁾。この廃プラスチックのうち、再生利用されているのは、その25%にすぎず、残りは単純焼却、埋立処分されているのが現状である。しかしながら、単純焼却した際の種々の問題、埋立処分場の不足から新規なりサイクル技術の開発が急務となっている。

以上のような環境問題、資源リサイクルの観点から、筆者らは今後急増する廃プラスチックの有効利用法として高炉に吹き込み、燃焼・ガス化する方法を提唱してきた²⁾。従来から固体燃料吹き込みとしては、微粉炭吹き込みに関して数多くの研究がなされてきている。ドイツにおいて高炉への廃プラスチック利用は実施されているが³⁾、高炉へ吹き込まれた廃プラスチックの燃焼・ガス化挙動についての報告は非常に少ない⁴⁾。廃プラスチックとしては、その粉碎特性、粉碎コストの観点から粒径1mmを超える粗粒の使用が望ましい。そこで、筆者らは粗粒プラスチックを対象に、モデル実験および試験溶解炉を用いてレースウェイに吹き込んだ際の燃焼・ガス化特性に解析、検討を加え、新たな

知見を見出した。本報告ではその結果を述べる。

2. プラスチック単一粒子の燃焼特性

2・1 実験観察方法

本研究で用いたプラスチックおよび微粉炭の分析値をTable 1に示す。プラスチック単一粒子の燃焼挙動を層流炉⁵⁾を用いて検討した。本装置の炉内は外熱式のヒーターにより1000~1300°Cに加熱され、炉上部より予熱されたガス(本実験では空気使用)が供給される。試料のプラスチック粒子は炉上部より定量的にフィーダーで炉内に微少供給され、落下する。その単一粒子の燃焼過程を両面に設けた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(応答時間0.5ms)により粒子温度測定を行った。撮影したフィルムは画像解析処理し、粒子火炎の観察を行った⁶⁾。

2・2 実験結果

Fig. 1には微粉炭(粒径:44~63 μ m,揮発分:33.32mass%)およびプラスチックとしてポリプロピレン粒子(粒径:0.425~0.85mm)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示す。図中に示した時間は着火を基準とした経過時間であり、炉内温度は1200°Cである。本結果によると、微粉炭の場合炉

平成9年2月24日受付 平成9年5月30日受理 (Received on Feb. 24, 1997; Accepted on May 30, 1997)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 kokan-cho Fukuyama 721)

* 2 NKK鉄鋼技術センター (Steel Technical Center, NKK Corp.)

Table 1. Properties of injection materials.

	Proximate analysis (dry base, mass %)			Ultimate analysis (dry base, mass %)				
	VM	FC	Ash	C	H	S	N	O
Coal	33.32	59.28	7.40	76.76	4.70	0.56	1.93	8.65
Polyethylene	99.87	-	0.13	84.83	14.08	-	-	-
Polypropylene	99.99	0.01	-	84.57	14.45	-	-	-
Polystyrene	99.59	0.41	-	92.29	7.69	-	-	-
Waste Polyethylene*	97.57	2.37	0.06	85.24	14.70	-	-	-

* Industrial waste plastics

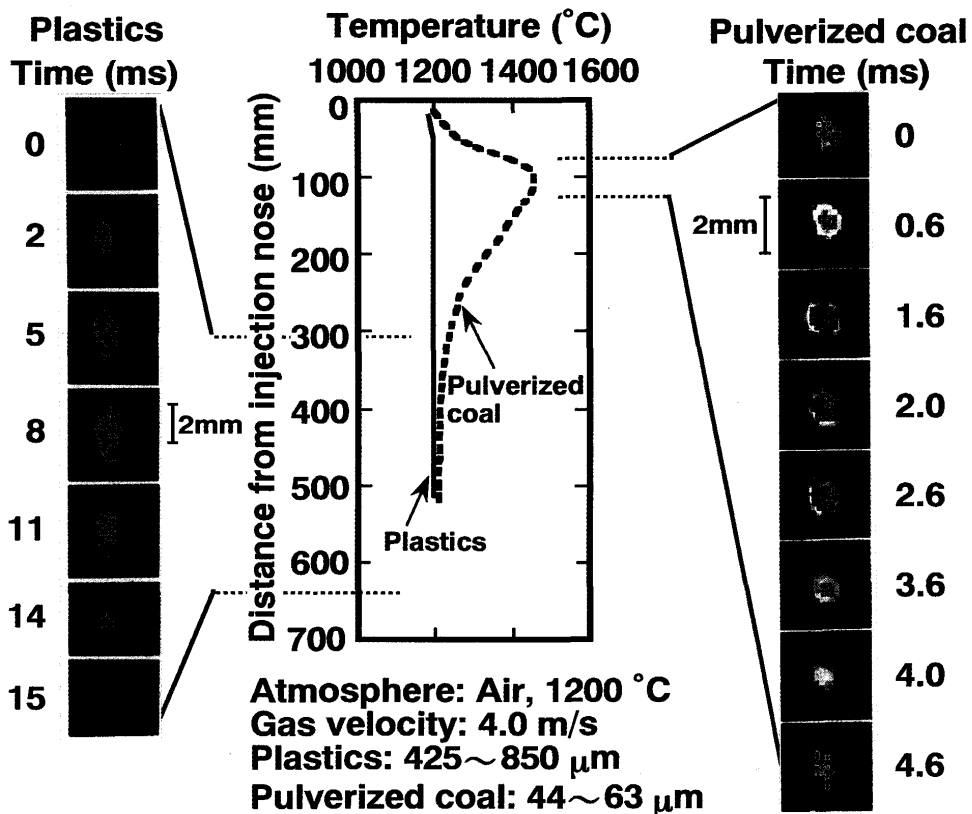


Fig. 1. Combustion behavior of plastics and pulverized coal.

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°Cに達する。また、観察される粒子火炎径は急速に拡大し、粒子径は約20倍に達する⁵⁾。そして、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。その経過時間は約5 msである。

一方、プラスチックの場合は、粒子径が異なるため着火は遅れ、粒子火炎が観察される状態でも粒子温度は雰囲気温度以上には達しない。また、火炎径の活発な成長も観察されない。

2・3 単一粒子の燃焼挙動

従来から知られているように微粉炭は急速加熱により急速熱分解を起こし、周囲に揮発分を放出する。粒子周囲において揮発分は火炎面を形成し、熱分解が活発な時期は揮発分の放出速度が大きく、Fig. 1の写真のように粒子から離

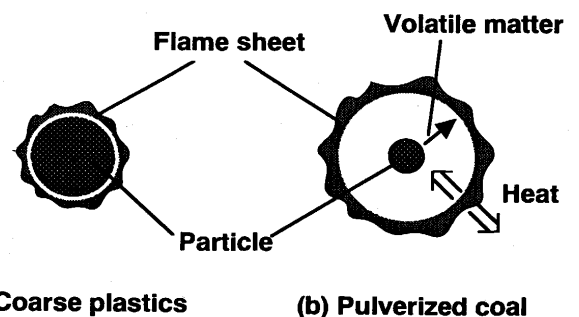


Fig. 2. Comparison of combustion mechanism.

れた位置に火炎面が形成されると考えられる⁶⁾。そして、火炎面で発生した熱が粒子に伝わって次の熱分解を促進し、急速燃焼が持続すると考えられる⁶⁾。プラスチックは単一化

合物(エチレン, プロピレン等)の重合物で細孔構造を持たない緻密な組織であり, 熱伝導性の差もあり粒子全体の瞬間的な熱分解が生じないと考えられる。粒子表面から徐々に溶融, 熱分解の過程を取る緩慢な燃焼であり, 表面燃焼に近い形態をとると推察される。Fig. 2に両者の燃焼機構を示す。

3. ホットモデルによる燃焼実験

3.1 実験装置および実験方法

次にFig. 3に示す実験装置(以降ホットモデルと称する)を用い, レースウェイを形成させた状態で粗粒プラスチックの吹き込み実験を行った。試験条件をTable 2に示す。本ホットモデルのブローパイプに設けられた観察孔からのプラスチック粒子燃焼の直接観察を行うとともに, 羽口反対側からレースウェイプローブを挿入し, レースウェイ内部のガス組成測定, また消耗型光ファイバーによる温度測定などを行い燃焼特性の検討を行った⁷⁾。燃焼率はコークス供給速度から装置より排出されるコークス粉発生速度を引いたコークス消費速度から算出した⁷⁾。

3.2 実験結果

高温場における粒子群としての燃焼挙動を観察するために, 羽口先端より後方1200mmの位置から粒径2~4mmプラスチックを吹き込んだ場合の高速カメラによる撮影結果をFig. 4に示す。本結果によると微粉炭の場合は粒子群の燃焼による火炎の生成が観察されるが⁸⁾, 粗粒プラスチック

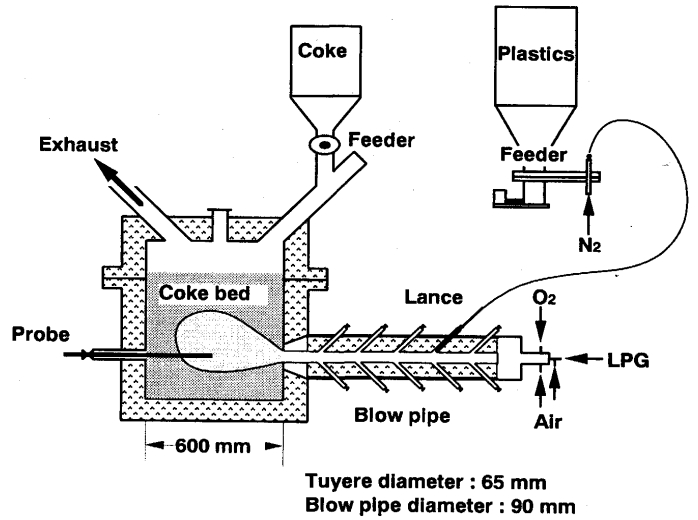


Fig. 3. Hot model for plastics combustion.

Table 2. Experimental conditions of hot model.

Plastics	Polyethylene
particle size	0.18 - 1.0, 2.0 - 4.0 mm
feed rate	48 kg/h (150 kg/t-plg)
Coke	25 - 40 mm
Blast	
temperature	1200 °C
feed rate	330 Nm ³ /h
velocity	140 m/s
O ₂ concentration	21 %
O ₂ excess ratio	0.70

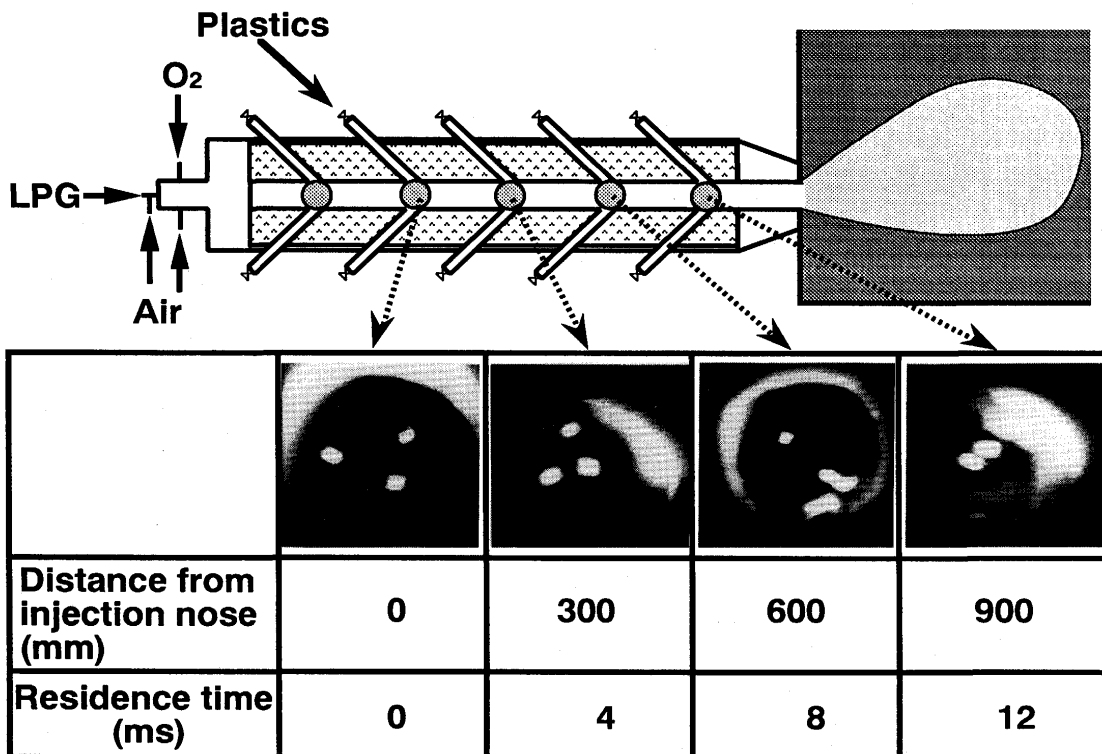


Fig. 4. Combustion behavior of plastics in blow pipe.

では吹き込み位置から900mmにおいても単一粒子の観察が可能で、微粉炭と異なり火炎の形成はみられない。表面がわずかに軟化している兆候が観察されるのみで、層流炉の結果と同様に緩慢な燃焼である。

次に、プラスチック吹き込み位置を羽口先端より後方300mmとした時のレースウェイ内のガス組成分布をFig. 5に示す。また本図中には比較のためにオールコークス、微粉炭(揮発分: 33.32mass%)の結果も示す。微粉炭吹き込みの場合、レースウェイ内で酸素は急速消費され、羽口先から100mmの位置で酸素はほぼ完全消費される。一方、粒径2~4mmの粗粒プラスチック吹き込みでは、オールコークスの場合に近く、200mm位置においても酸素は残存している。図中には、粒径を0.18~1.0mmに変更した場合のガス組成分布も示すが、CO₂のピーク位置が羽口側に接近する傾向が

認められるものの、基本的に酸素消費の遅い挙動は変わらない。また消耗型光ファイバーによるレースウェイ内温度分布の測定結果をFig. 6に示す。微粉炭吹き込みでは、燃焼焦点(最高温度位置)が羽口側に接近するのに対し、プラスチックでは燃焼焦点はガス組成の結果と同様にオールコークスの場合に近い。

Fig. 7にはホットモデルでコークス置換率との関係から求めたプラスチック燃焼率とプラスチック粒子の代表径(累積重量分率50%時の粒径)との関係を示す。同図に微粉炭(揮発分: 33.32mass%)の結果も示す。酸素過剰率はプラスチックの場合は0.7、微粉炭では0.7~0.9である。微粉炭の燃焼率は50~60%であるが、プラスチックでは代表粒径0.57mmの小径粒子が約80%の燃焼率を示し、粒径1.38, 3.5mm粒子は約100%の燃焼率を示した。すなわちプラスチックは微

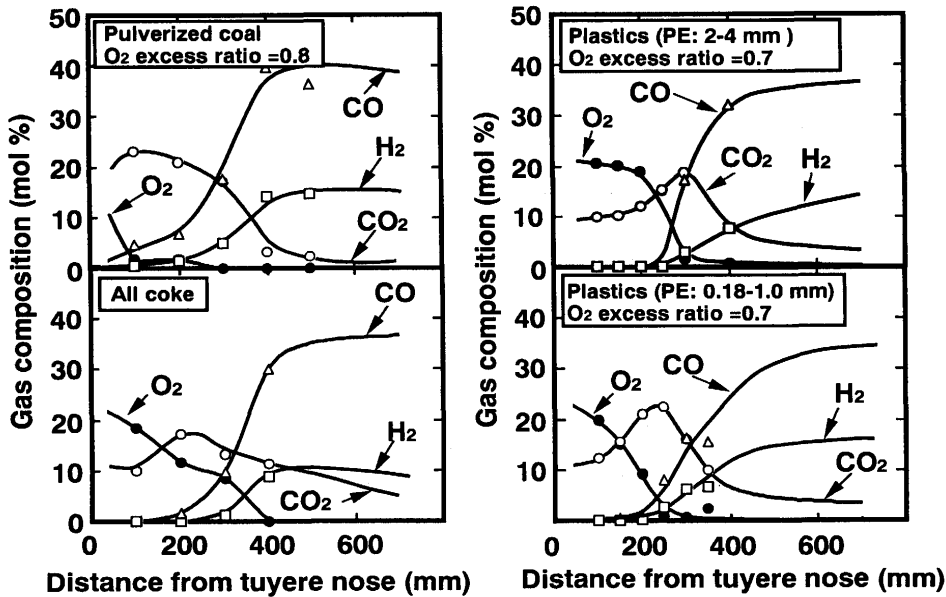


Fig. 5. Change in gas composition in raceway.

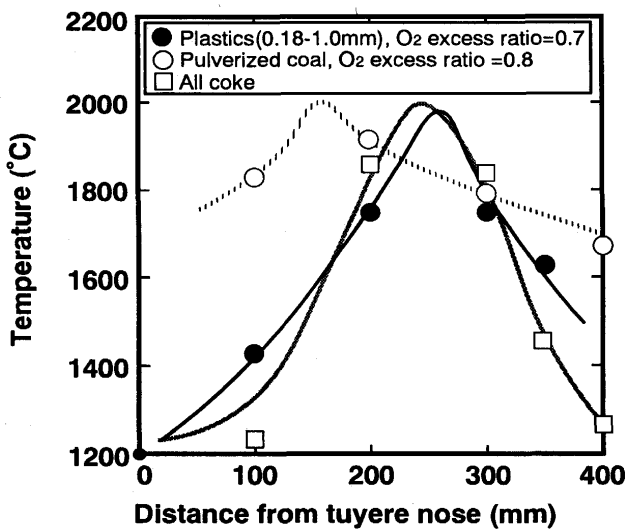


Fig. 6. Temperature distribution in raceway of hot model.

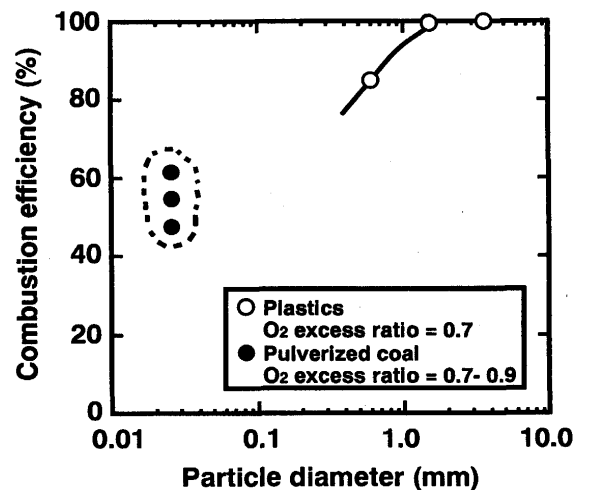


Fig. 7. Effect of particle diameter on combustion efficiency measured in hot model.

粉炭より粒径が大にもかかわらず高い燃焼率を示し、粒径が小さい場合のほうが燃焼率が低下する傾向が伺える。この結果から、レースウェイ内におけるプラスチックの燃焼挙動が微粉炭と異なることが予測される。試験中にレースウェイ内より採取されたダスト中には表面が溶融し、粒径の小くなったプラスチック粒子が観察されたが、熱割れを起こしたと思われる粒子はみられず、羽口先温度2000°C程度の雰囲気中にプラスチック粒子が吹込まれても、熱割れは起こさないと推測された。また、炉頂より排出されるガスおよびダスト中には、微量の低級炭化水素は検知されたものの、タール成分、プラスチック由来のチャーおよび未燃のプラスチック粒子は検出されなかった。

4. スクラップ溶解炉におけるプラスチック吹き込み実験

4.1 実験方法

既報のシャフト型スクラップ溶解炉(炉容積: 2m³, 炉床径: 0.85m, 羽口: 3本)^{9,10)}の操業の一貫としてプラスチック吹き込み実験を行った。操業に用いたコークスは粒径20~40mmの高炉用コークス、吹き込み燃料の燃焼条件としては酸素過剰率0.9、羽口先温度を2200°C~2400°Cとした。プラスチックの種類としてはポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、ポリスチレン(PS)、粒径は-1mm, 2~4mmと広範に変更した。なお、いずれの操業でも燃焼バーナーとして酸素バーナーを用いた¹¹⁾。

4.2 プラスチックの燃焼特性

プラスチックの単独吹き込みおよび微粉炭とプラスチックを同時に吹き込み、それぞれの燃焼挙動に注目した。燃焼率は投入炭素、炉頂ガス組成および炉頂より排出されるダスト中炭素を含む炉全体の炭素収支から求めた。Fig. 8に

は燃料比および酸素過剰率を一定に保ちながら、微粉炭とプラスチックの吹き込み量比を変更した場合の結果を示す。この燃焼率は微粉炭とプラスチックの燃焼率を区別できないため、両者の平均燃焼率を示す。同図から明らかなように、吹き込みプラスチック量比が増加するに従い、燃焼率は上昇する。ホットモデルと同様に、プラスチックのほうが粒度が大であるにもかかわらず、高い燃焼率を示すことが推測される。

Fig. 9にはオールコークス、微粉炭およびプラスチック吹き込み操業時の羽口先温度と羽口先冷却水の抜熱量の関係を示す。微粉炭吹き込みでは燃焼焦点の羽口側への接近によって抜熱量は大となったが、プラスチック吹き込みではオールコークス操業の場合に近い。この傾向は羽口先温度に依存しなかった。プラスチックはレースウェイ奥で燃焼・ガス化していると推測される。この結果はホットモデルで得られたガス組成分布、温度分布の結果と一致する。

5. レースウェイ内の燃焼・ガス化挙動に関する考察

単一粒子の燃焼試験結果から、プラスチックは単一成分より形成され緻密な構造であるため1200°C程度の高温場でも熱割れは起こりにくく、周囲から表面燃焼し徐々に粒径が低下していくものと考えられる。一方、ホットモデル実験およびスクラップ溶解炉の結果からは、レースウェイ内に吹き込まれた粗粒プラスチックは熱割れ現象を起こさず、粒度が大であるにもかかわらず最終的には高い燃焼率を達成できている。

以上より、レースウェイ内に吹き込まれた粗粒プラスチックの燃焼に関し、次のモデルを考案した。すなわち、レースウェイ内に吹き込まれた粗粒プラスチックはレースウェイ内の奥で循環滞留し、一定粒度に至るまで燃焼・ガス

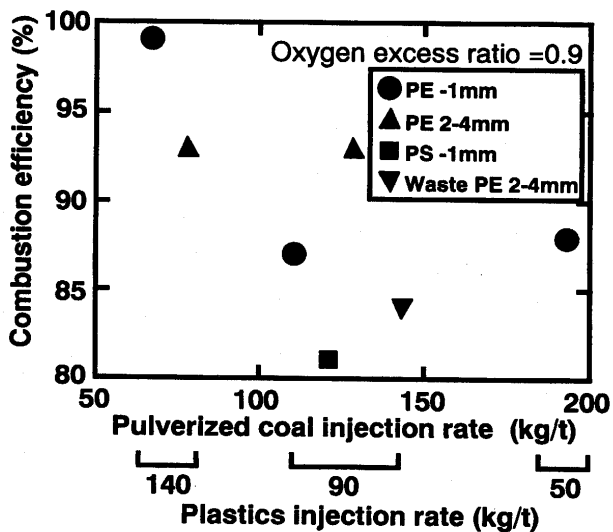


Fig. 8. Combustion efficiency of fuels in scrap melting shaft furnace.

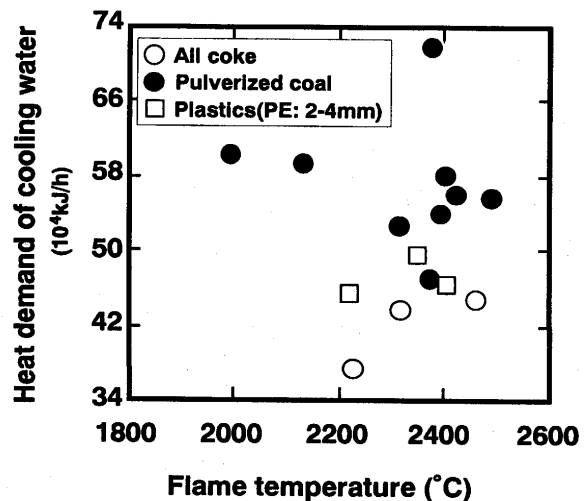


Fig. 9. Heat demand of cooling water of tuyeres in scrap melting shaft furnace.

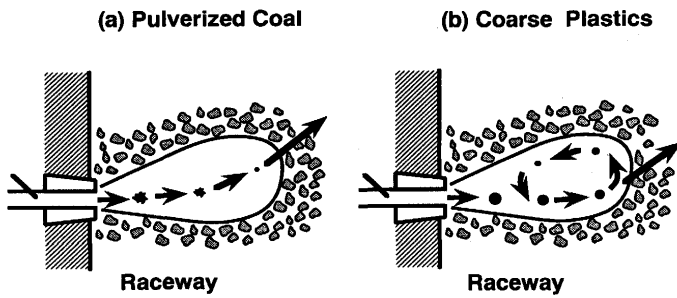


Fig. 10. Combustion mechanism of coarse plastics.

化して、限界粒子径以下になるとレースウェイから飛散する。燃焼速度が緩慢であっても、その循環滞留特性から高い燃焼率を達成しようと考えた。筆者らの冷間実験でも、実際に粗粒粒子の滞留循環挙動が確認されている¹²⁾。その概念図をFig.10に示す。

微粉炭は極めて微粒であり、粒子は気流に同伴され、一次元的な運動をとると考えられる。一方、粒度の粗いプラスチックはレースウェイ境界領域のガス速度と終末速度の関係で定まる限界粒子径まで滞留し、その初期粒子径 r_0 と限界粒子径 r_1 から燃焼率が決まると考えた。すなわち、粗粒プラスチックの燃焼率は次式で表わせる。

$$\eta \propto 100 \cdot \{1 - (r_1/r_0)^3\} \dots\dots\dots (1)$$

本モデルでは初期粒子径が大であるほど、燃焼率は上昇する。ここで、ホットモデルの条件を対象に、レースウェイ形状を球形と仮定し、レースウェイ境界のガス速度から限界粒子径 r_1 を算出した。ただし、一回の通過におけるプラスチックの燃焼率を微粒プラスチックの試験結果をもとに酸素の境膜移動律速モデルより求めて¹³⁾、(1)式に加算し、限界粒子径以上の粒子の燃焼率を算出した。

この循環モデルによる計算結果とホットモデルの実測値をFig.11に示す。両者の傾向はほぼ一致する。よって、粗粒プラスチックのレースウェイ内の燃焼・ガス化機構は本循環モデルで説明されると考えられる。

6. 結言

(1)粗粒プラスチック単一粒子の燃焼挙動は微粉炭と異なる。表面反応の形態を取り緩慢な燃焼である。

(2)ホットモデル実験、スクラップ溶解炉操業結果より、プラスチックは粒径が大であるにもかかわらず高い燃焼率が達成できる。また羽口先よりはレースウェイ奥で燃焼・ガス化している兆候がみられる。

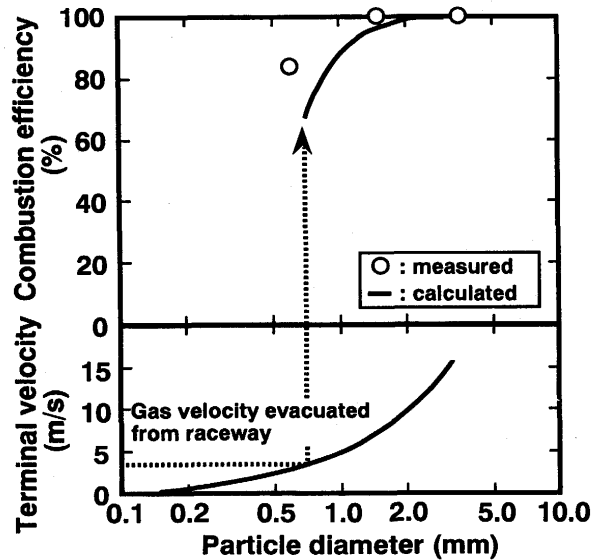


Fig. 11. Combustion efficiency of plastics calculated by circulating model.

(3)レースウェイ内における粗粒プラスチックは滞留循環していると推察され、粒子滞留時間を前提とした燃焼・ガス化モデルにより燃焼率の推算を行った結果、ホットモデルの実測値とほぼ一致した。

以上の結果より、粗粒のプラスチックは高炉のレースウェイに吹き込むことにより、レースウェイ内に保持され高い燃焼率を達成でき、吹き込み原料として効率的に利用できると考えられる。

文 献

- 1) 都市と廃棄物, プラスチック処理促進協会編, 26 (1996), 50.
- 2) 浅沼 稔, 有山達郎, 佐藤道貴, 村井亮太, 浅川幸彦: 材料とプロセス, 9 (1996), 754.
- 3) J.Janz and W. Weiss: Proc. 3rd European Ironmaking Cong., CRM; VDEh, Liège; Dusseldorf, (1996), 114.
- 4) 山口一良, 出野 正, 今野乃光: 材料とプロセス, 9 (1996), 193.
- 5) 有山達郎, 山川裕一, 佐藤道貴: 鉄と鋼, 81 (1995), 703.
- 6) C.W.Lau and S.Niksa: Combustion and Flame, 90 (1992), 45.
- 7) 有山達郎, 佐藤道貴, 村井亮太, 宮川一也, 野沢健太郎, 上条綱雄: 鉄と鋼, 81 (1995), 1114.
- 8) 有山達郎, 佐藤道貴, 山川裕一, 山田善郎, 鈴木 実: 鉄と鋼, 80 (1994), 288.
- 9) 有山達郎, 野田英俊, 松浦正博, 鹿田 勉, 村井亮太, 井ノ口孝憲, 中村博巳, 炭竈隆志: 材料とプロセス, 9 (1996), 241.
- 10) 松浦正博, 有山達郎, 野田英俊, 浅沼 稔, 小西武史, 伊藤春男, 平岡英伸, 築地秀明, 森 候寿: 材料とプロセス, 9 (1996), 242.
- 11) Yotaro Ohno, Takeshi Furukawa and Masahiro Matsu-ura: ISIJ Int., 34 (1994), 641.
- 12) 浅沼 稔, 有山達郎: 材料とプロセス, 9 (1996), 755.
- 13) 国井大蔵: 流動化法, 日刊工業新聞社, 東京, (1962), 317.