論説

Paper

廃プラの炭材としての利用技術

服部 正*

Recycling Technique of Waste Plastics as Carbon Material

Tadashi Hattori

Synopsis

Disposal of waste plastics amounts to about 10 million-t every year and 3 million-t of them are occupied to fill land and one of the causes to extinct space in Japan. As far, waste plastics have been applied to rotary kiln for cement manufacturing and fuel of blast furnace and coke oven as typical use. On the other side, use of carbon materials has been also developed on decrease of electric power consumption and oxygen blowing operation in an electric arc furnace.

In this paper, a recycling technique has been developed to utilize waste plastics as one of carbon materials for an electric furnace, and the effectiveness was examined by using a mass-production furnace. Results obtained are as follows.

1) Reduction of electric power consumption

Reduction of electric power consumption comparable with coke can be confirmed.

2) The increase of [C] in melting steel

A several percent increase by carbon containing plastics is confirmed.

1 . 緒 言

廃プラは廃プラスチック類という項目に分類される廃棄物である。日本国内における年間排出量は約 1000 万 t であり、300 万 t 近くが埋立て処分されている¹⁾ため、最終処分場枯渇の一因となっている。筆者らは、このうち毎年約 200 万 t 埋立て処分されている産業廃棄物系の廃プラに注目し、プラスチック中に含まれる炭素分を電炉の炭材として有効にリサイクルするための技術開発を進めている。

廃プラを電炉用炭材として利用する場合、中間処分場で破碎処理されたものをそのまま電炉内に装入すると、廃プラが高温の電炉内で急激に燃焼し周辺装置を損傷させるため、操業上問題がある。そこで、廃プラの燃焼持続時間を延長させるとともにその嵩張りを軽減するため、廃プラを減容固化する技術を開発した。また、実炉を用いて電炉溶解試験を行うことにより、減容固化物が熱源または加炭剤としてどの程度有効であるかの確認を行ったので、その内容を報告する。

2 . 開発したプロセスの概要

今回開発したプロセスを Fig.1 に示す。原料の廃プラは鉄粉と混合された後、ロータリーキルンで加熱される。これにより廃プラと鉄粉との造粒体（溶融物）が得られる。得られた造粒体は固化化プレスを用いて緻密化され、電炉投入用の減溶固化物となる。このプロセスについて以下に種々の検討を行った結果を示す。

3 . 廃プラの固化化技術

3.1 固化物の成形サイズの決定と緩慢燃焼

固化物の成形サイズは、電炉内での固化物の燃え切り時間を卓上実験装置で得られた知見から外挿することにより決定した。

亀嶋ら²⁾は、鉄とプラスチックを 1:1 の割合で混合させた固化物を用いて、1273 K の大気熱流下にある環状炉内で 10 ~ 50 までの小型固化物の燃焼による反応速度を測定し、(1)式で示される実験式を得ている。

$$\ln = 1.497 \ln A + \ln 8.882 \times 10^{-6} \quad (1)$$

ここで、 $(1/s)$ は反応速度、 $A(\text{mm}^2/\text{g})$ はエリアインデックスと名付けられた量であり、(2) 式で表される。

$$A = (\text{非接触表面積}(\text{mm}^2) \times \text{接触表面積}(\text{mm}^2))^{0.5} / \text{重量}(\text{g}) \quad (2)$$

(2) 式において接触表面積は熱流が固化物に直接接触する面の面積、非接触面積は全表面積から接触面の面積を差し引いた面積である。

いまここで、固化物の形状が一辺 200 mm の立方体であるとする、全表面は 240000 mm^2 、下面の面積（非接触表面積）は 40000 mm^2 であり、また重量は約 10000 g とおくと、 $A = (40000 \times 200000)^{0.5} / 10000 = 8.94$ と求められる。よって、 $\ln = 2.36 \times 10^{-4}$ となり、反応速度の逆数が反応時間であるので、反応時間は約 4200 s と求められる。したがって、一辺が 200 mm の立方体固化物は、燃焼時間が約 70 分であることが予想され、一般的な電炉のほぼ 1 チャージの溶解時間に相当することから、固化物の標準成

形サイズとして採用した。

3.2 固化物に混装する鉄粉の選定

電炉工場では鉄スクラップを搬送・装入する際にリフティングマグネット（以降リフマグと略）と呼ばれる大型の電磁石が用いられている。廃プラと鉄からなる固化物は鉄スクラップ中に混装して使用するため、鉄粉はリフマグによる搬送を可能にする働きを持つことが望まれる。この条件をみたす鉄粉はいくつか考えられるが、ここでは、定期的にまとまった量が排出され、安定的に入手できることと、組成が比較的安定しており試験データを得るのに適しているという観点から自動車工場などから排出される乾式の加工ダライを選定した。

3.3 廃プラの減容固化方法

廃プラを加熱軟化させ、鉄粉との造粒体（溶融物）を形成させるため、ロータリーキルンを用いて処理を行った。

Table 1 にロータリーキルンの主な仕様を示す。

Fig.1. Schematic diagram of development process.

Table 1. Main specification of rotary kiln.

Items	Specification
Type of heating	Direct heating from the opposite direction for product (Re-heat system by exhaustion gas)
Size	Diameter 1350 × length 4800 mm (Lifting bar height × pcs. 110 H × 8)
Slope of kiln	1/100 (1/100 ~ 3/100 variable)
Rotation per minutes	0.3 rpm ~ 4 rpm (3.2 rpm at 60 Hz) Variable (by inverter)
Heater	Capacity : 1293 Nm ³ /h max. temperature 623 K Fuel : LNG (13A) max. consumption 11.9 Nm ³ /h
Circulation fan	Type : Turbo fan (single suction type) Capacity : 30 m ³ /h at 450 mmAq. Motor power : 7.5 kW

Fig.2. Variation of rate of outgoing weight of iron powder toward each inserting rate of weight.

Fig.3. Variation of rate of outgoing weight of broken plastics toward each inserting rate of weight.

ロータリーキルンの最適運転条件を調査するために、冷間で廃プラ（材質ポリプロピレン）と鉄粉をそれぞれ別個にロータリーキルンに装入し、装入から排出までの挙動を調査した。なお、鉄粉は銑鉄グライ（かさ密度 2.0 g/cm^3 ）を使用した。また、ロータリーキルンの回転数は 4 rpm とした。Fig.2 は鉄粉のロータリーキルンへの装入量と排出量との関係を、Fig.3 は廃プラのロータリーキルンへの装入量と排出量との関係をそれぞれ示したものである。この試験から、廃プラと鉄粉のように、かさ密度と形状のいずれもがたがいに大きく異なる材料であっても、装入量と排出量が等しくなる時間はほぼ等しく 900 秒 程度という結果が得られた。したがって、鉄粉と廃プラはロータリーキルン内では、均一に混合し搬送できることを確認できた。

つぎに、ロータリーキルンの熱精算を行うことにより熱効率を調査した。Fig.4 にロータリーキルンの入熱・排熱系統図を示す。熱精算は、各箇所の温度および風量測定から、入熱量および排熱量を計算することにより実施した。ロータリーキルン炉内における熱収支から熔融効率が、バーナーにおける熱収支から排ガス利用効率が算出できる。Table 2 は鉄粉として銑鉄グライを、廃プラとしてポリプロピレン (PP) および ABS をそれぞれ廃プラ：鉄粉 = 1:1 で混装し、ロータリーキルンにて処理した場合の熱精算結果である。ここで、廃プラ PP と廃プラ ABS はそれぞれ 4:1 で配合している。Table 2 から、排ガスの利用効率を (3) 式で、装入物への着熱効率を (4) 式でそれぞれ評価すると、Table 3 の結果が得られた。

$$\text{排ガスの利用効率} = \frac{\text{循環ガス熱量}}{\text{キルン炉内総入熱量}} \quad (3)$$

$$\text{装入物への着熱効率} = \frac{\text{装入物の加熱に使用される熱量}}{\text{キルン炉内総入熱量}} \quad (4)$$

つぎに、固形化プレスによる成形条件を検討した。実験

Fig.4. Thermal balance of rotary kiln.

Table 2. Thermal balance of rotary kiln.

Materials (kg/h)	Waste plastics		250
	Iron powder		250
Heating condition (Temperature, Air flow)			533 K, 750 Nm ³ /h
Thermal balance on rotary kiln (kJ/h)	Input	Combustion air of burner	14700
		Materials	1000
		Input total	15700
	Output	Heating of material	5200
		Exhaustion	5700
		Thermal dispersion from body	1800
		Thermal dispersion except body	3000
		Output total	15700
Burner (kJ/h)	Input	Fuel Combustion	11000
		Circulation air	3600
		Suction air	200
		Input total	14800
	Output	Combustion air	14700
		Thermal dispersion from piping	100
		Output total	14800

Table 3. Result for thermal efficiency of rotary kiln.

Thermal recycling efficiency of exhaustion air (%)	23
Thermal efficiency of rotary kiln (%)	33

Table 4. Main specification of press.

Item	Specification
Type	Hydraulic press (Max. load 20 t, Stroke 675 × 4cylinder)
Size	Length 10900 × Width 4000 × Height 5300
Standard mold	Molding quantity per cycle : 4 (Array 2 × 2) Inner Size : 200 × 200 × depth 500
Capability	500 kg/h (mold water-cooling time : 60 s)

に用いた固化化プレスの主仕様を Table 4 に示す。金型は 1 辺が 200 mm の正方形で、プロセスの進行方向に対して 2 行 2 列の 4 個取りとなっている。このプレスを用いて適正加圧条件を調査した。廃プラとして、破碎装置にて 50 mm アンダーで破碎された、ポリプロピレン (PP) および ABS を使用した。また、鉄粉としては銑鉄ダライを使用した。配合率は廃プラ PP : 廃プラ ABS : 鉄粉 = 4:1:5 とした。

Fig.5 に 4 つの金型 (A ~ D で図示) における加圧荷重と製品高さの関係を示す。また、加圧荷重と製品の密度との関係を Fig.6 に示す。Fig.5 および Fig.6 から荷重に対する高さとの関係においてはバラツキが認められるが、製品の密度との関係においては、大きなバラツキはほとんど認められなかった。つまり、プレス荷重は、金型あたり $9.8 \times 10^4 \text{ N}$ 以上、言い換えれば、2.5 MPa 程度の成形圧力があれば均一な密度の固化物が成形できることが確認できた。

Fig.5. Relationship between load and height of solid.

Fig.6. Relationship between load and solid density.

4. 電炉における固化物溶解試験

廃プラの構成物であるポリプロピレンは炭素 85 % になる有機化合物である。そのため、廃プラを炭素 85 % の炭材とみなし、炭素当量で評価すれば、コークスや無煙炭と同じ炭素源として取り扱えると考えられる。そこで、廃プラの炭材としての有効性を調査するために、実際に廃プラと鉄粉からなる固化物を電炉に装入し、溶解試験を実施した。熱源としての有効性は着熱効率で、加炭剤としての有効性は加炭効率で評価した。ここで、着熱効率とは炭材の発熱量に対して、電炉操業における電力原単位が減少した割合にアークの着熱効率を掛けたものであり、(5) 式にて表される。

$$\text{着熱効率 \%} = (\text{炭材なし電力原単位} - \text{炭材装入時の電力原単位}) \times \text{アーク効率} / \text{炭材の発熱量} \quad (5)$$

ここに示された電力原単位はスラグ酸化物組成による影響や休憩時間を考慮に入れた補正電力値である。

また加炭効率とは、廃プラ中の炭素分に対する、鉄スクラップ溶け落ち直後の C 上昇割合をさす。

4.1 試験方法

電炉操業では、鉄スクラップを 2 回または 3 回に分けて装入し、溶鋼を出鋼している。このうち、初回に装入するスクラップの中に、先入れ炭材としてコークスや無煙炭を装入し、熱源や加炭材として使用されている。固化物を炭材として有効に使用するためには、電炉内の温度が比較的低い初装で装入することが有利であり、周辺設備に悪影響を与えないことにもなる。固化物は、装入用バスケット内の鉄スクラップの間にサンドイッチ状に装填し、電炉内へ

Fig.7. Relationship between carbon consumption and heat efficiency of combustion.

装入した。

4.2 試験結果

炭材装入量と着熱効率の関係を Fig.7 に示す。図中には炭材がコークスや無煙炭の場合の結果と、固化物も含む場合の結果が示されている。炭材の発熱量は (6) 式のように評価した。

$$33.8 \text{ kJ/kg} \times 0.3 + 10.2 \text{ kJ/kg} \times 0.7 = 17.3 \text{ kJ/kg} \quad (6)$$

ここで、カーボンの二次燃焼率の値は 0.3 とした。また、33.8 kJ/kg は、炭材の完全燃焼時の発熱量、10.2 kJ/kg は不完全燃焼時の発熱量である。Fig.7 から着熱効率は、炭材の溶解チャージあたりの装入重量が増えるにつれ減少することが認められた。また、廃プラを添加したチャージは炭材のみを装入して操業している実操業チャージと比べてほぼ同じ挙動を示すことが認められた。

Fig.8 に廃プラの原単位と溶け落ち時 [C] 値の関係を示す。[C] 値の評価にあたっては、鉄スクラップからの [C] の寄与分は差し引いて評価した。得られたデータから、線形回帰分析により、固化物中のプラスチック 1 kg / 溶鋼 t に対し、[C] 値は 0.0032 % 上がることが確かめられた。

これら一連の固化物溶解試験では、無煙炭などの炭材添加量は固化物を使用しない通常操業と同じ条件で使用しているため、[C] 値の上昇分はそのまま、固化物中の廃プラによる加炭効果であると考えられる。そこで、この結果を使用して廃プラ原単位で 10 kg / 溶鋼 t 装入した場合の加炭効果を (7) 式のとおり試算した。ただし、電炉の溶鋼量を A(t) とする。

$$\text{加炭効率 (\%)} = \text{実 C 歩留り量 (kg)} / \text{廃プラ中の C 量 (kg)} \times 100 \quad (7)$$

ここで Fig.8 から、溶け落ち C 上昇分は 0.032 % なので、

Fig.8. Relationship between plastic consumption and melting down [C].

$$\begin{aligned} \text{実C歩留り量 (kg)} &= \text{溶鋼量 (t)} \times \text{溶け落ちC上昇分} \\ &= A \times 1000 \times 0.032 \times 0.01 \\ &= 0.32A \text{ kg} \end{aligned} \quad (8)$$

が得られる。一方、廃プラ中のC量は

$$\begin{aligned} \text{廃プラ中のC量 (kg)} &= \text{溶鋼量 (t)} \times \text{廃プラ投入量 (kg/t)} \\ &\quad \times \text{廃プラ中C量} (= 85\%) \\ &= A \times 10 \times 0.85 = 8.5A \text{ kg} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。よって、廃プラの加炭効率は $0.32A / 8.5A \times 100 = 3.8\%$ となる。

4.3 考察

Fig.7 のデータを装入した全炭素中に占める廃プラ中の炭素の割合で整理した。これを、Fig.9 に示す。Fig.9 から、廃プラからの炭素分が占める割合が増加しても、着熱効率は廃プラ未使用の炭材のみの操業とほぼ同じレベルであることがわかる。すなわち、減容固化による廃プラは熱源としてコークスや無煙炭などの炭材とほぼ同じ効果が認められることが判明した。

一方、加炭効果では、廃プラ中の加炭効率は3.8%に留まった。この原因は、一般鋼、普通鋼の実操業では、炭材を加炭源よりもむしろ熱源として活用しているため、大量の酸素を溶鋼に吹き込み、炭材は排ガス化してしまうため溶鋼中に留まり難くなるためと推定される。

5. 結 論

今回、廃プラと鉄粉を混装し、固形化することで電炉の熱源や加炭剤として一定の効果があることが確認できた。ただし、今回の電炉溶解試験では、単純に既存の電炉操業条件上に廃プラを追装した試験であり、有機物である廃

Fig.9. Relationship between carbon content from plastic and heat efficiency of combustion.

ラの利用条件としての最適化は図られていない。今後、電炉排ガスの組成分析および熱精算を実施し、炭材としての最適な利用条件を詰めていく必要がある。これにより、熱源としての最適利用方法および加炭剤としての最適利用方法について電炉操業条件の確立を目指す。また、廃プラは炭素と水素からなる有機化合物であるため、塩化物と結びついて生成するダイオキシン類との関係を明らかにすることも今後の課題として残されている。

6. 謝 辞

本研究の一部は、経済産業省および独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO 技術開発機構) の助成を受けて実施したものである。関係各位に感謝する。

(文 献)

- 1) プラスチック処理促進協会編: プラスチックリサイクルの基礎知識。
- 2) 亀嶋保, 堀田雅也, 成瀬一郎, 大森浩志: 製鋼用電炉における熱源・炭素源としての廃プラスチックの適応, 第147回日本鉄鋼協会春季講演大会, 大岡山, 2004。