

流動層を用いた使用済みプラスチックガス化プロセスの開発

Development of Innovative Gasification Process for Used Plastics by Using Fluidized Bed

百野 浩一	MOMONO Koichi	JFE スチール	スチール研究所	カーボンニュートラルプロセス研究部
石井 純	ISHII Jun	JFE スチール	スチール研究所	カーボンニュートラルプロセス研究部 主任研究員 (課長)
細原 聖司	HOSOHARA Seiji	JFE スチール	スチール研究所	カーボンニュートラルプロセス研究部 主任研究員 (副部長)
木島 秀夫	KIJIMA Hideo	JFE スチール	スチール研究所	カーボンニュートラルプロセス研究部長

要旨

使用済みプラスチックの海洋流出が世界的に問題となっており、国際取引が規制されているため、大量の使用済みプラスチックを国内で処分する必要がある。一方で発熱量の高い使用済みプラスチックはエネルギー源として利用できる可能性がある。そこで流動層を用いたガス化プロセスを新たに開発した。現在商業プロセスで使用されているよりも低い温度でのガス化反応制御により、高発熱量のガスが得られる可能性があることに着目し、併せてガス化率を向上させるためにガス化剤として水素富化ガスを、反応器内の流体媒体として触媒を使用した。その結果、使用済みプラスチックを適切なガス化温度と触媒により熱分解させることで高発熱量ガス (LHV: 5 000 kcal/Nm³) を生成することに成功した。

Abstract:

Used waste plastics flowing into ocean has become a worldwide problem. In recent years international trade in used waste plastics has been regulated. Therefore, a large amount of used plastics should be disposed domestically. On the other hand, used plastics with high calorific value could be used as an energy source. We have newly developed a gasification process of used plastics using fluidized bed. In this process, used plastics were decomposed in a fluidized bed reactor at around 600°C which was lower temperature than that used in current commercial processes. Higher calorific value gas could be attained by a gasification reaction control at lower temperature than that used in current commercial processes. Hydrogen enriched gas and catalysts were used as gasifying agent and fluid medium in the reactor, respectively, to improve gasification efficiency. High calorific value gas (LHV:5 000 kcal/Nm³) could be successfully produced from pyrolysis of used plastics by appropriate gasification temperature and catalyst.

1. はじめに

近年、使用済みプラスチックによる海洋汚染が深刻な問題となっており、少なくとも年間 800 万トンもの使用済みプラスチックが全世界の海洋に流入していると言われている¹⁾。

これらが海洋生物に取り込まれることにより生態系に重大な影響を与える可能性が世界的に懸念されており²⁾、2018 年にはカナダで開催された主要 7 ヶ国首脳会議で「海洋プラスチック憲章」が採択され、採択国は 2030 年までにすべてのプラスチックをリユース、リサイクル、回収可能となるようにすることなどが求められている。また 2019 年にはバーゼル条約の規制対象物質が改正され、汚れた使用済みプラスチックの国境を越えた移動が禁止されることとなった。このためこれまでリサイクル用原料として大量に海外に輸出さ

れていた使用済みプラスチックを国内で処理する必要に迫られている。

一方、使用済みプラスチックは石炭と同等以上の高い発熱量を有し、エネルギー資源の少ない我が国にとって貴重なエネルギー源として活用できる可能性がある。使用済みプラスチックを固形燃料として使用する方法として RPF (Refuse derived paper and plastics densified Fuel) が知られている。RPF は使用済みプラスチックを古紙等と混合し加熱成型したもので、主に製紙用ボイラー燃料に用いられる³⁾。しかし、燃焼速度が遅くエネルギーとしての汎用性が低いいため、使用用途が限られるといった課題がある。

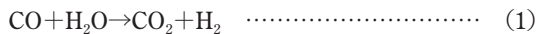
これらの課題を解決するため、本研究では使用済みプラスチックを熱分解によりガス化するプロセスを開発することとした。ガス化とは、固体や液体 (石炭・廃棄物・バイオマス・重質油等) をガス状の成分 (一酸化炭素・水素・二酸化炭素・メタン・HCs (Hydrocarbons)) に変換する技術である。本研究においては廃棄物 (使用済みプラスチック)

2023 年 9 月 13 日受付

からガス状の成分（本研究では主に C₁~C₄ の軽質炭化水素）を生成させることがガス化に相当する。生成ガスの発熱量は高い方が製鉄所内の各プロセスの燃料として使用しやすく、また高炉還元材として用いる場合でも有効に利用できる可能性がある。生成ガス低位発熱量（LHV）の目標を製鉄所内で用いられるコークス炉ガスに相当する発熱量（5 000 kcal/Nm³）以上と設定して、高発熱量ガスの生成を目指すこととした。

使用済みプラスチックを原料としてガス化するプロセスの代表例として株式会社荏原製作所と UBE 株式会社が開発した EUP 法がある。本プロセスは、2 塔の流動層において、1 300~1 500℃で酸素と空気を用いてガス化し H₂ と CO を生成させることを特徴としている⁴⁾。しかし、EUP 法によって得られたガスは H₂ や CO が主となるためガスの発熱量は低い。また JFE エンジニアリングは 2005 年にサーモセレクト方式ガス化改質炉設備を稼働させた⁵⁾。可燃ごみ、焼却灰および下水汚泥といった廃棄物を 2.0~9.0 t/h の処理速度で、1 200℃の温度で酸素を用いて燃焼させることで燃料ガスを生成させた。しかし、生成ガスの代表性状は H₂/CO/CO₂/N₂=33.2/31.4/31.9/3.3 vol% との報告があり、LHV は約 1 800 kcal/Nm³ と推定され発熱量は低い。そこで本研究では生成ガスの発熱量を増加させるために分解温度に注目した。使用済みプラスチックのガス化に関する既往の研究報告における分解温度は 700℃以上のものが多く^{6,9)}、生成ガスの LHV は 1 000~3 200 kcal/Nm³ である。従って本研究では LHV: 5 000 kcal/Nm³ 以上の高発熱量ガスを生成させるために、より低温の領域でガス化することで、H₂ や CO に比べ高発熱量を持つ軽質炭化水素の分解を抑制することとした。

本研究では、ガス化剤に H₂ を含有させるため、製鉄所副生ガスである転炉ガスを用いた。転炉ガスは精錬の過程で転炉から排出されるガスであり、H₂ をほとんど含まず CO 濃度が 65 vol% と高いため、反応器に導入する前に水蒸気を添加させることで式 (1) に示すシフト反応をおこさせ、H₂ 濃度を高めた。



以上、本稿では、LHV: 5 000 kcal/Nm³ 以上の高発熱量ガスを生成させることを目的として、転炉ガスをシフト反応させたガス化剤を用いて使用済みプラスチックをガス化する際に、触媒や分解温度がガス化に与える影響を調べた。ガス化剤とは、熱分解反応等を促進させるためのガス（空気、酸素、水蒸気、二酸化炭素等）である。

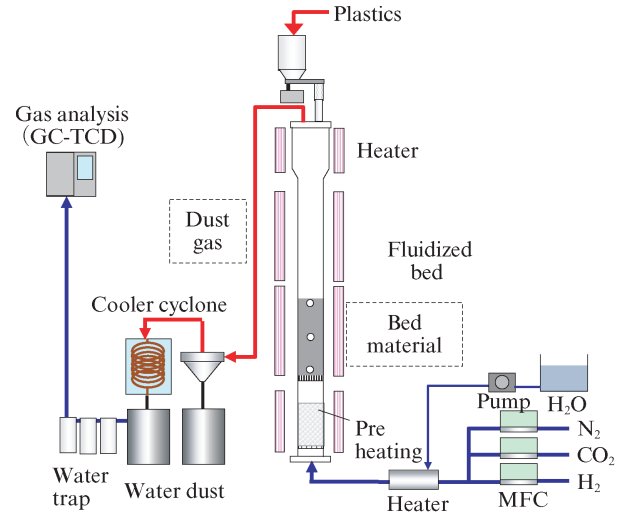


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental equipment

2. 実験方法

2.1 流動層ガス化試験装置

プラスチックガス化の基礎的な挙動を明らかにするため、流動層を反応器とした使用済みプラスチックガス化試験装置を作成し実験を実施した。流動層は他の反応器と比較して、流動媒体内部の温度分布が均一かつ制御が容易であることが特徴である¹⁰⁾。図 1 に実験装置の構成を示す。

本装置は、流動層ガス化炉、ガス化剤供給系、プラスチック供給系、および生成ガス清浄装置からなる。ガス化炉は外熱式ヒーターにより 650℃まで昇温可能とした。ガス化炉下部に 5 メッシュの開孔を有する焼結金属製の分散板を設置し、分散板下部からガス化剤を供給して、分散板上部に装入した流動媒体を流動化させた。水、N₂、CO₂ および H₂ は流量制御装置を介して予熱器に送り 150℃に昇温した。水は予熱器内部で気化して供給した。プラスチック供給系は、ガス化炉上部に設置した供給ホッパーより振動フィーダを用いて定量供給させる構造とした。流動層の径 (D) に対する、流動層の高さ (L) の比を L/D と定義した。L/D は流動層の流動安定性を決定づける指標の一つであり、すべての実験で一定値になるよう触媒の装入量を調整した。ガス化剤予熱部はガス化剤の供給による流動層の温度低下を防ぐ目的で設けた。

2.2 実験条件

2.2.1 流動媒体

本実験では、流動層の流動媒体として、広く用いられている珪砂、製鉄所内で安価に得ることができ触媒効果によるガス化の促進が期待できる OG ダスト、および γ-アルミナを使用した。珪砂は粒径が 80 μm~300 μm の 7 号珪砂を用いた。また OG ダストは転炉から排出される鉄分を多く含む

ダストであり、ガス化炉外への噴出を防ぐために事前に分級し、粒径を 45 μm~200 μm とした。γ-アルミナは一般的に吸着剤や工業用触媒として使われている 75 μm~150 μm の球状 γ-アルミナを用いた。流動状態に影響をおよぼす真密度は流動媒体の種類により差異が見られた。鉄分を含む OG ダストが最も真密度が高く、γ-アルミナ、珪砂と続いた。高密度は γ-アルミナの方が珪砂より小さかった。

2.2.2 分解温度

流動層におけるプラスチック分解温度は、プラスチックの熱分解メカニズムを考慮して決定した。Moon ら、および Narobe らの報告を基に推定したプラスチックの熱分解メカニズムを図 2 に示す^{11,12)}。

プラスチックは鎖状炭化水素の重合体により構成されており、熱を加えることで直鎖が切断され分解される。まず図 2 (a) に示す固体プラスチックが 400℃前後で加熱されることで、図 2 (b) で示すような炭素数 5~50 の液状の油分やタールに分解される。さらに 500~600℃に加熱すると、図 2 (c) で示すように炭素数 1~4 の軽質炭化水素ガスに分解される。さらに 700℃以上に加熱することで図 2 (d) に示すように CO、CO₂ および H₂ が生成される。CO、CO₂、および H₂ は発熱量が低いため、5 000 kcal/Nm³ 以上のガスを生成させるためには熱分解の進行を図 2 (c) の状態で止める必要がある。そこで本研究では熱分解の進行を図 2 (c) の状態で止めるために分解温度を 700℃以下に抑え、550℃、600℃、650℃の分解温度におけるプラスチックガス化挙動を調査した。

2.2.3 ガス化剤

本実験では、使用したすべての流動媒体で安定操作が可能な条件として、ガス化剤量を 4.0 NL/min に固定した。ガス化剤組成については、前述のようにプラスチックの分解促進に有効と考えられる H₂ を利用するため、転炉ガス

(LDG) をシフト変性により改質し、H₂ 濃度を増幅したガスを用いることとした。

シフトコンバータに常温 (25℃) の LDG と 250℃に加熱した水蒸気を供給した。LDG と水蒸気の混合比率は、シフト反応後の温度がシフトコンバータの使用可能最大温度である 430℃となるように決定した。シフト反応前後のガス組成を表 1 に示す。

算出されたシフト反応後のガス組成に基づき本実験のガス化剤組成を決定した。CO はガス化剤として使われることはなく、本実験を行ううえで実験結果に大きな影響はないと考え、ガス化剤組成を N₂/CO₂/H₂/H₂O=9/30/25/36 vol% とした。

2.2.4 原料プラスチック

本研究で用いたプラスチックとその特性を表 2 に示す。

2.3 実験方法

流動層を外部ヒーターで指定温度まで加熱した後、流動層下部より 150℃に予熱した N₂、CO₂、H₂ および H₂O を指定量混合させたガス化剤を導入した。その後、振動フィーダを用いてプラスチックを 300 g/h で流動層内部に供給した。プラスチックの分解により生成されたガスを一定時間おきにガスバックで捕集し、ガスクロマトグラフ (GC-TCD) で、N₂、CO₂、H₂、CO および軽質炭化水素 (炭素数 1~4) の含有率を測定した。生成ガスの評価項目として、LHV

表 1 ガス組成

Table 1 Gas composition

Gas	Flow rate (NL/min)	N ₂ (vol%)	CO ₂ (vol%)	CO (vol%)	H ₂ (vol%)	H ₂ O (vol%)
LDG	1.63	18	15	65	1	1
Steam	2.37	0	0	0	0	100
Gasifying agent	4	7	30	2	25	36

表 2 プラスチックの特性

Table 2 Property of plastics

Plastic	Size (mm)	LHV (calculated) (kcal/kg)	C (wt%)	H (wt%)	N (wt%)
Crashed plastics	0.6~2.0	9 754	77.5	12.7	0.1
O (wt%)	Cl (wt%)	Fe (wt%)	Ash (wt%)	Moisture (wt%)	PE ^{※1} (wt%)
4.5	0.1	0.1	5.1	0.3	77
PP ^{※2} (wt%)	PS ^{※3} (wt%)	PVC ^{※4} (wt%)	PET ^{※5} (wt%)	Insoluble (wt%)	
16	<1	1	<1	5	

※1 : Polyethylene ※2 : Polypropylene ※3 : Polystyrene
 ※4 : Polyvinyl chloride ※5 : Polyethylene terephthalate

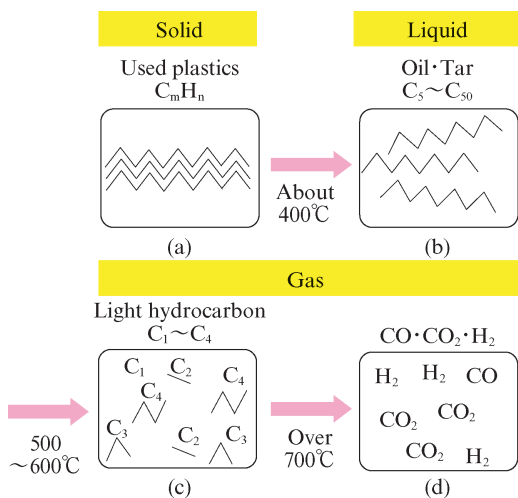


図 2 使用済みプラガス化の熱分解メカニズム

Fig. 2 Mechanism of gasification process of waste plastics by thermal decomposition

(kcal/Nm³) とガス化率 (wt%) を用いた。LHV は生成ガスの発熱量を示す指標の一つであり、JIS K 2301 8.2 の計算方法を元に次式で定義した。

$$H_0 = \frac{\sum H_i R_i}{100}$$

H₀ は生成ガスの LHV (kcal/Nm³)、H_i は生成ガスを構成する各ガスの LHV (kcal/Nm³)、R_i は生成ガスを構成する各ガスの含有率 (vol%) である。ガス化率は、プラスチック中の炭素が生成ガスに移行する割合を示し、ガスの生成効率を示す指標の一つである。Koyama らの計算を元にガス化率を次式で定義した¹³⁾。

$$\eta = \frac{\sum \left(V_i \times \frac{12}{22.4} \times C_i \right) - \sum \left(V_j \times \frac{12}{22.4} \times C_j \right)}{W_p \times \frac{C_p}{100}} \times 100$$

η は生成ガスのガス化率 (wt%)、V_i は生成ガスを構成する各ガスの生成量 (NL/h)、C_i は生成ガスを構成する各ガスの炭素数、V_j はガス化剤を構成する各ガスの量 (NL/h)、C_j はガス化剤を構成する各ガスの炭素数、W_p は実験に使用したプラスチック量 (g/h)、C_p はプラスチックの炭素含有率 (wt%) である。各ガスの炭素数とはガス 1 分子あたりに含まれる炭素の数を示し、CH₄ であれば 1、C₃H₈ であれば 3 である。

3. 実験結果

3.1 プラスチックガス化試験の推移

プラスチックを粉砕プラスチック、流動媒体を OG ダスト、温度を 600℃とした実験の生成ガスの組成を図 3 に示す

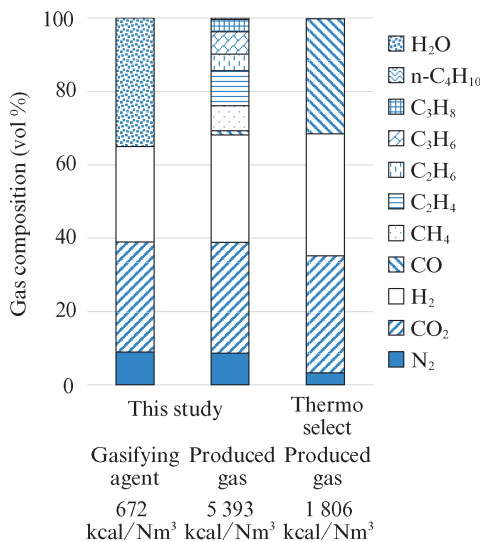


図 3 生成ガス組成

Fig. 3 Composition of gas product

(原料供給時間: 1.5 h サンプル間隔: 30 min 3 回のサンプルの平均データを示す)。

本実験で得られた生成ガスは、高発熱量を有する軽質炭化水素の生成が確認されたことから、発熱量が大幅に向上したと言える。なお、水蒸気はトラップで除去しているため生成ガス中には飽和水蒸気分しか含まれておらず、微量なため本グラフには記載していない。前述のサーモセレクト法による生成ガスと比較すると、ガス化温度が低温のため CO、H₂ の生成が抑制されていることが確認できる。

またガス化剤を N₂ 100% に変更した場合の LHV は 2 713 kcal/Nm³、H₂ 26 vol%、N₂ 74 vol% に変更した場合の LHV は 4 361 kcal/Nm³ であった。C₁~C₄ の軽質炭化水素の含有率は N₂ 100% の場合 17.3 vol%、H₂ を含んだ場合は 25.1 vol% だったため、H₂ が発熱量の増幅 (軽質炭化水素の増幅) に効果があることが確認できる。

3.2 分解温度と触媒の影響

分解温度が生成ガス発熱量やガス化率におよぼす影響を確認するために、触媒として OG ダストを用いた実験結果を図 4 に示す。

ガス化温度 550℃では LHV とガス化率はともに低位であった。またガス化率は全温度範囲で低位であった。これは OG ダストの触媒活性が低いからと推定される。

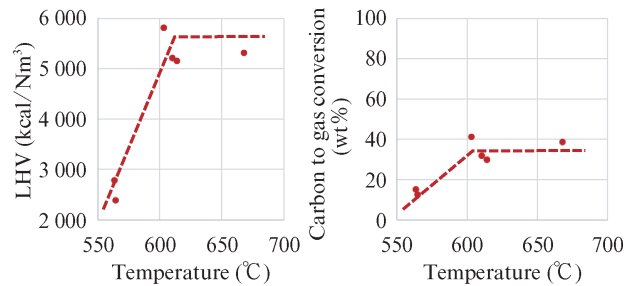


図 4 分解温度がガス化に及ぼす影響

Fig. 4 Effect of temperature on gasification

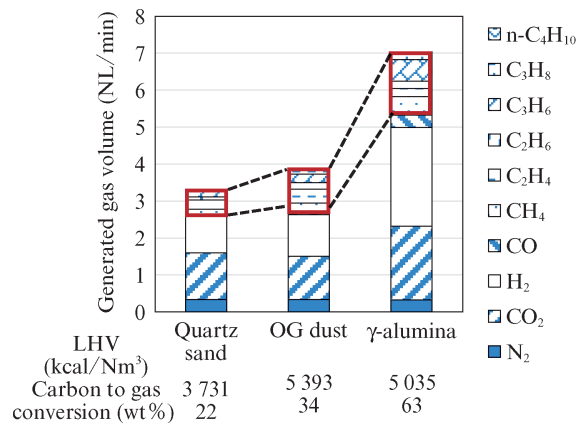


図 5 触媒がガス化に及ぼす影響

Fig. 5 Effect of catalyst on gasification

次に触媒が発熱量やガス化率におよぼす影響を確認するために、600℃の分解温度で触媒を変えた実験結果を図5に示す（原料供給時間はすべて1.5h）。

OGダストを用いた場合の実験結果が最もLHVが高く、LHV: 5 000 kcal/Nm³以上の高発熱量ガスを生成できた。また珪砂より高いガス化率を示した。これはOGダストに触媒作用があることを示している。一方でγ-アルミナと比較するとガス化率が低位であったため、次項でその原因と対策について考察する。

4. 考察

4.1 触媒効果

使用済みプラスチックを熱分解してガス化する際に触媒として用いたOGダストの触媒メカニズムについて検討した。OGダストの主成分は酸化鉄であるが、Funaiらによると酸化鉄は高温水蒸気存在下でプラスチックや重質油の分解に触媒として作用する¹⁴⁾。図6に概念図を示す。

酸化鉄中の格子酸素が消費されることによるプラスチックの分解と、水分子の分解により生成された酸素の欠損部への補填が交互に起こると推定されている。生成した水素は、プラスチックの水素化分解反応に用いられ、軽質炭化水素ガス生成を促進すると考えられる。OGダストを用いた実験の生成ガス組成を確認すると、珪砂を用いた場合と比較して軽質炭化水素ガスの発生量が増加していることがわかる。OGダストの主成分は酸化鉄であるためOGダスト中の酸化鉄を触媒として有効利用できれば、さらにガス化率の向上が狙えると考えた。そこで次のような実験を行った。

流動層径19mmの小型実験装置を用い、プラスチックはPP（ポリプロピレン）を3g/hで1h供給し、分解温度を600℃とした。ガス化剤はAr/H₂/CO₂=40/30/30 vol%の混合ガスを60 ml/minで供給した。触媒として珪砂、FeO、Fe₃O₄およびFe₂O₃の酸化鉄試薬各1gと、流動砂として珪砂を10g混合したものをを用いた。図7に実験結果を示す。

ガス化率が最も高いのはFe₂O₃で、以下、FeO、Fe₃O₄、珪砂の順であった。しかしFe₂O₃でもガス化率はγ-アルミナと比較して低位であった。そこで、メカニズムを解明するためにOGダストの断面をSEM観察した。図8に2次元画像化した結果を示す。

OGダストはMetal-Feを核とし、その外側は酸化鉄で覆われており、表面の大部分がCaで被覆されていることがわかる。図9にXRD（X-Ray Diffraction）の分析結果から推定されるOGダストの構造を示す。

OGダストは3層構造であり、内側からMetal-Fe、FeOもしくはFe₃O₄、Ca(OH)₂と推定された。Ca(OH)₂は製鋼スラグ由来のものと考えられる。最外殻のCa(OH)₂は熱分解によりCaOを生成させる。また生成ガス中にはCO₂が含まれているため、反応によりCaCO₃が生成される。つまり

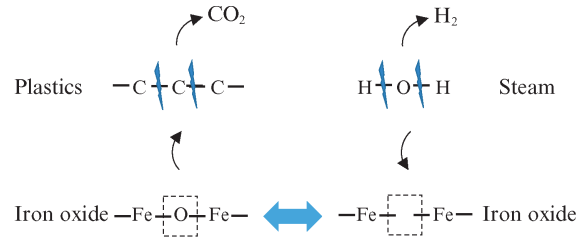


図6 酸化鉄の触媒作用

Fig. 6 Catalytic behavior of iron oxide

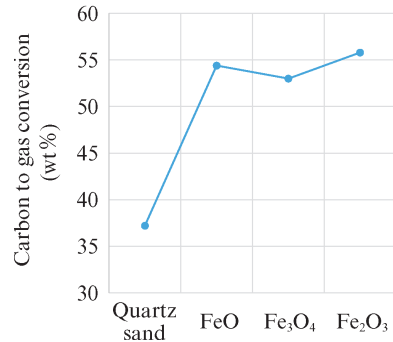


図7 触媒がガス化率に及ぼす影響

Fig. 7 Effect of catalyst on carbon to gas conversion

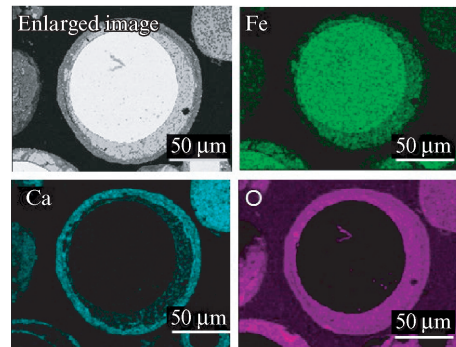


図8 OGダストのEDXマッピング

Fig. 8 EDX-Mapping of OG dust

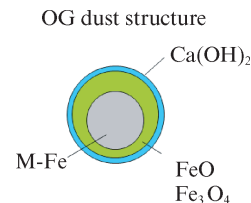


図9 OGダストの構造

Fig. 9 Structure of OG dust

CaCO₃のシェルが生成されることで触媒活性が低下したと考えられる。

Knozingerによると、γ-アルミナは高温水蒸気存在下で酸素のやり取りを行うため、触媒活性があることが報告されている¹⁵⁾。また、OGダストと比較してγ-アルミナのガス化率

に優位性が見られた点に関し、松岡らにより γ -アルミナは表面に無数の細孔を有するため、比表面積が $200\text{ m}^2/\text{g}$ と大きく、タールとの接触効率がいため、触媒効果が高いと報告されている¹⁶⁾。以上から、酸素含有ガスである、 CO 、 CO_2 の増加および芳香族炭化水素の分解により、 H_2 および低級炭化水素の増加が促進されると考えられる。図5によると CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 が増加しており、推定メカニズムどおりの結果が示されている。このことは、OGダストも γ -アルミナと同様に接触効率を改善させることによって、触媒性能を向上させる可能性を示している。

4.2 今後の展望

本研究において、触媒を流動媒体とした流動層反応器によって低温でガス化することにより、使用済みプラスチックから高発熱量のガスを生成できることが明らかになった。

γ -アルミナは価格が2万円/kg以上と高価なため、今後はOGダストによるガス化率向上を図ることを検討したい。具体的には、OGダストの触媒性能向上（ガス化率の向上）を目指す。

また、本プロセスの商業化には、使用済みプラスチックの処理量拡大のため、流動層反応器をスケールアップする必要がある。流動層反応器の直径を拡大すると、外部ヒーターによる伝熱が不十分となるため、流動媒体を外部で加熱しながら循環利用する手法の開発が求められる。今後、効率的な流動媒体の循環、加熱方法を検討する。

5. おわりに

使用済みプラスチックガス化技術の開発を目的として実験的検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 使用済みプラスチックをガス化する際に、触媒としてOGダストを使用し、流動層を用いて転炉ガスをシフト変性させたガスを導入しながら分解温度を $600\sim 650^\circ\text{C}$ の条件に制御することで、高発熱量($5\,000\text{ kcal}/\text{Nm}^3$ 以上)のガスを製造できることを示した。
- 2) OGダストを流動層において使用済みプラスチックガス化触媒として使用することにより、珪砂を用いる場合と比較してガス化率が向上した。OGダストはカルシウムのシェルに被覆されているため、これを除去することで触媒効果のさらなる向上が期待できる。

参考文献

- 1) Industry Agenda Report. World Economic Forum. The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf (accessed 2023-02-13).
- 2) 高田秀重. マイクロプラスチック汚染の現状, 国際動向および対策. 廃棄物資源循環学会誌. 2018, vol. 29, no. 4, p. 261-269.
- 3) 竹中元康. RPFの動向と次世代固形燃料C-RPF. 紙パ技協誌. 2007, vol. 61, p. 1454-1458.
- 4) 杉山秀子, 佐藤隆夫. 廃プラスチックのケミカルリサイクル技術. 環境技術. 2001, vol. 30, no. 10, p. 787-791.
- 5) 藤原善治, 長井俊久, 山田純夫. サーモセレクト方式ガス化改質炉制御システム. JFE 技報. 2007, no. 15, p. 43-46.
- 6) Arena, U.; Zaccariello, L.; Mastellone, M. L. Fluidized bed gasification of waste-derived fuels. Waste Management. 2010, vol. 30, issue 7, p. 1212-1219.
- 7) Toledo, J. M.; Aznar, M. P.; Sancho, J. A. Catalytic Air Gasification of Plastic Waste (Polypropylene) in a Fluidized Bed. Part II: Effects of Some Operating Variables on the Quality of the Raw Gas Produced Using Olivine as the In-Bed Material. Ind. Eng. Chem. Res. 2011, vol. 50, no. 21, p. 11815-11821.
- 8) Martínez-Lera, S.; Torrico, J.; Pallarés, J.; Gil, A. Thermal valorization of post-consumer film waste in a bubbling bed gasifier. Waste Management. 2013, vol. 33, issue 7, p. 1640-1647.
- 9) Cho, M.-H.; Choi Y.-K.; Kim, J.-S. Air gasification of PVC (polyvinyl chloride)-containing plastic waste in a two-stage gasifier using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for the production of clean and hydrogen-rich producer gas. Energy. 2015, vol. 87, p. 586-593.
- 10) 化学工業会編. 固体反応プロセス工学. 積書店, 1979, 265p. (p. 135).
- 11) Moon, J.; Park, Y. C.; Ryu, H.; Lee, S.; Jin, G. T. A study of gas and solid mixing behaviors in a three partitioned fluidized bed. Adv. Powder Technol. 2013, vol. 24, issue 6, p. 1086-1094.
- 12) Narobe, M.; Golob, J.; Klinar, D.; Francetic, V.; Likozar, B. Co-gasification of biomass and plastics: Pyrolysis kinetics studies, experiments on 100 kW dual fluidized bed pilot plant and development of thermodynamic equilibrium model and balances. Bioresource Technol. 2014, vol. 162, p. 21-29.
- 13) 小山俊太郎, 田中真二, 松尾光広, 森原淳, 野北舜介. 気流層石炭ガス化特性に対する炭種の影響とガス化効率の評価. 燃料協会誌. 1986, vol. 65, no. 9, p. 746-755.
- 14) Funai, S.; Fumoto, E.; Tago, T.; Masuda, T. Recovery of useful lighter fuels from petroleum residual oil by oxidative cracking with steam using iron oxide catalyst. Chemical Engineering Science. 2010, vol. 65, issue 1, p. 60-65.
- 15) Imelik, B.; Naccache, C.; Coudurier, G.; Ben Taarit, Y.; Vadrine, J.C. Catalysis by Acids and Bases. Elsevier Science, Amsterdam, 1985, 444p. (p. 111)
- 16) Matsuoka, K.; Shimbori, T.; Kuramoto, K.; Hatano, H.; Suzuki, Y. Steam Reforming of Woody Biomass in a Fluidized Bed of Iron Oxide-Impregnated Porous Alumina. Energy Fuels. 2006, vol. 20, no. 6, p. 2727-2731.

本論文は主執筆者が同じく執筆した、流動層を用いた使用済みプラスチックガス化プロセスの開発 (鉄と鋼 2023年109巻9号掲載) の一部記事を削除して転載しております ©2023 日本鉄鋼協会