円筒形 RDF 単一粒子の燃焼に関する研究[†]

劉 貴慶^{1††}・山崎量平¹・羽多野重信¹・藤間幸久²・森 滋勝¹

¹名古屋大学大学院工学研究科 分子化学工学専攻, 464-8603 名古屋市千種区不老町 1 番地

²名古屋大学理工科学総合研究センター, 464-8603 名古屋市千種区不老町 1 番地

中小自治体で発生した廃棄物を固形化燃料 (RDF) とする大規模ごみ発電プロセスが注目されている。しかし、RDF の燃焼特性については流動層とストーカーにおいて大きな差異がある。これらの差異を説明するための基礎的知見を得るために、一般廃棄物から造られた RDF の単一ペレット (直径 20 mm, 長さ 40 mm) の燃焼特性について電気炉を用いて検討した。低速昇温と急速昇温条件下の RDF の重量および温度分布の経時変化を測定した結果、RDF ペレットの燃焼時における重量減少過程は二段階となる。第 1 段階における反応は、主に揮発分の熱分解であり、RDF の減量速度と RDF 内部の温度分布は昇温速度に依存する。低速昇温の場合には、内部の温度勾配が小さく、重量減少は熱分解反応速度が支配的となるが、急速昇温の場合には、内部の温度勾配が大きく重量減少は RDF 内の伝熱速度が支配的となることが明らかになった。第 2 段階における重量減少は、主に固定炭素分の燃焼であり、反応の進行と温度分布が雰囲気酸素濃度の影響を強く受ける。酸素濃度の高い雰囲気では燃焼熱が RDF 内部で蓄積され高温ピークが現れる。また、使用された RDF の着火温度は約 480°C であり、着火現象が昇温速度の影響を受けることが目視観測で分かった。

緒 言

我が国における一般廃棄物の発生量は年間約 5,000 万トンに達し、そのほぼ 73% が焼却処分されている。一方、廃棄物の発熱量は 1,500~2,500 kcal/kg と高カロリー化が進み、エネルギーの有効利用が重要な課題となっている。エネルギー利用の最も有力な方法は、ボイラを設置して発電を行うことであるが、ごみ処理量が最低 150 t/d 以上の大型炉しか経済性が成立しない。さらに、通常のプラントでは塩素化合物による高温腐食の制約から蒸気温度が 300°C に制限されるため、10~15% の低い発電効率しか得られない。さらに、最近のダイオキシン排出規制の強化のため、ごみ処理量 100 t/d 以下の回分式や半回分式の小規模炉は事実上運転できなくなっている。

これらの問題を解決する方法の一つとして注目されているのが、中小自治体で発生した廃棄物を固形化燃料 (Refuse Derived Fuel: RDF) に加工し、一個所に集積して大規模ごみ発電を行う方法である。

RDF は ASTM 基準によって 7 つのタイプに分類されるが、一般的に日本で使用されているのは緻密型 RDF (タイプ 5) であり、性状と発熱量の安定化とともに、回収・輸送・貯留が容易となる。また、3,000~4,000 kcal/kg の高発熱量が得られるため、燃料として高効率に利用できる。さらに RDF 中に添加されているカルシウム分により燃料中の塩素分を固定できるので、排ガス中の塩化水素濃度を十分に低い値に保つことができるため、蒸気条件の向上による高効率化発電が期待できる (Mieken Kigyocho, 1995)。

RDF の燃焼プラントとしては、ストーカー炉と流動層炉とが有

力である。現状では小型商業炉による燃焼結果と試験プラントによる燃焼試験データ (Narukawa *et al.*, 1996 a; Mieken Kigyocho, 1995; Wakayama *et al.*, 1994) しか報告されていないが、ストーカー炉による燃焼データと流動層炉によるデータとは、炉内温度分布、飛灰収率、排ガス中の NO_x、および HCl 濃度などに大きな差異が見られる。ストーカー炉内では、薄層の RDF が低速度で水平方向に移動し、燃焼ガスが底部から流入する十字流接触である。RDF の昇温速度は数 10°C/min であり、RDF 粒子は流入空気と直接に接触する。一方、流動層炉では媒体 (珪砂) の流動化によりほぼ均一な燃焼温度に保たれた炉内に RDF が投入されるため、RDF の表面温度は瞬時に炉内温度に達する。また、RDF は酸素濃度が低い濃厚相内で燃焼する。

RDF の基礎燃焼特性については、RDF 粉碎粉の燃焼特性が成川ら (Narukawa *et al.*, 1996 b) によって報告されているが、RDF 単一ペレットの燃焼特性に関しては、研究報告がきわめて少なく (Hachiya *et al.*, 1997; Cozzani *et al.*, 1995 a, 1995 b)、ほとんど解明されていない。

本研究では、RDF 単一ペレットの燃焼特性を明らかにするとともに、前述のストーカー炉内と流動層炉内との燃焼特性の差異を説明するための基礎的知見を得るために、昇温速度と雰囲気酸素濃度の差異が RDF 単一ペレットの燃焼特性に与える影響を検討する。

1. 実験装置及び方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。反応器は、内径 53 mm, 長さ 1,000 mm の石英ガラス製で、その中間部約 600 mm が透明電気炉 (Trans Temp 社製, Gold Furnace) 内に設置されており、RDF ペレットに最も近い部分の管壁温度 (T) が炉温として PID 方式で制御される。その昇温速度 (dT/dt) も PID 方式で 10°C/min から 40°C/min まで調整される。さらに、反応管上部約 200 mm は、管内を 200°C 以下の温度に維持するために水冷ジャケットが設置してある。下部約 200 mm は供給ガスの整流部と予熱部となっ

[†] 1998 年 6 月 22 日 受理

1997 International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologis (Oakland, 1997 年 5 月) にて発表

^{††} h961314 d@eds.ecip.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Sampling points: C,M,S

Fig. 2 Sampling points for temperature measurement in RDF

いる。金網かごを含む石英製のサンプル皿は、インコネル 600 合金の細線（線径 0.1 mm）によりデジタル電子天秤と結ばれている。サンプル皿は滑車群により反応管の上部低温ゾーンから中間部の高温ゾーンへ速やかに移動させることができる。RDF の温度測定を行う際には、熱電対型センサーを RDF の表面及び内部に設置し、Fig. 2 に示す 3 点 (C, M, S) の温度 (T_c , T_m , T_s) と RDF サンプルの側面から約 10 mm 離れた位置におけるガス温度 (T_g)

Table 1 Analysis of the RDF

Fuel Type	Catrel RDF
Higher Heating Value (MJ/kg)	15.28
Proximate Analysis (wt %)	
Moisture	7.3
Volatile	67.7
Fixed Carbon	0.8
Ash	24.2
Ultimate Analysis (wt %)	
Carbon	35.2
Hydrogen	5.11
Nitrogen	0.55
Oxygen	32.3
Sulfur	0.09
Chlorine	0.61
Calcium	14.5
Ca/Cl ₂ (molar ratio)	41.6

を測定する。酸素濃度を一定に維持した燃焼用ガスは底部から供給される。ガス中の酸素濃度は純窒素と空気の供給比を調整することによって 0~21% に調整される。ガスの流入流量は、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ (25°C, 101 kPa において) で一定値に保つ。

実験は、ストーカー型燃焼炉内を想定し RDF サンプルを RDF 表面の昇温速度が $100^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下の低速昇温させる条件下と、流動層型燃焼炉内を想定し RDF 表面の昇温速度が $1,000^\circ\text{C}/\text{min}$ 以上の急速昇温条件下で反応させるために、サンプルを一定の反応管壁温度（以下では炉温と略記する）に保った反応管の高温ゾーンへ瞬時に移動させる急速昇温条件下で行った。低速昇温の場合にはサンプルを反応管内に設置した後、昇温速度を $10 \sim 40^\circ\text{C}/\text{min}$ にして昇温し、炉温が設定値に到達した後、一定に維持される。急速昇温の場合には、サンプルを所定の炉温 ($T = 800^\circ\text{C}$) に保持された反応管の高温ゾーンへ瞬時に移動させる。

実験用サンプルとしては、Table 1 に示す一般廃棄物から製造された RDF を使用した。サンプルの形状は直径 20 mm、長さ 40 mm の円柱状であり、密度は約 $1,200 \text{ kg}/\text{m}^3$ である。

2. 実験結果と考察

2.1 熱分解及び燃焼過程の目視観察

RDF の熱分解及び燃焼現象が昇温速度によって大きく異なることが目視観察によっても認められた。燃焼ガスとして空気を流した場合の結果を以下に示す。

2.1.1 低速昇温の場合 昇温速度が $10^\circ\text{C}/\text{min}$ の場合、炉温が約 300°C に達した時、白い熱分解ガスの放出が観察され、 450°C 付近からガスの放出が見えなくなり、その後、RDF 表面から内部へとチャー燃焼過程が進行した。ガスが最も激しく発生した炉温域は $350^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ であった。 500°C 付近で明瞭な火炎は観察されなかったが炉内の圧力が急に上昇した。これは RDF 内部で発生した少量の熱分解ガスの着火によると思われるが、気相燃焼現象は目視できなかった。

昇温速度が $20^\circ\text{C}/\text{min}$ の場合、炉温が約 350°C に達してから熱分解ガスの放出が観察され、 $400^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ においてガスの発生が最も激しかった。また、 $480^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ のあたりで着火の様子が見られたが、その後すぐ RDF 表面から中心へと無炎燃焼が進行した。

昇温速度が $40^\circ\text{C}/\text{min}$ の場合、炉温が 400°C 付近に達してから熱分解ガスの放出が始まり、 $480^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ において発生ガス量が

Fig. 3 Photography of burnt RDF samples

最も多かった。また、 $470^{\circ}\text{C}\sim 490^{\circ}\text{C}$ において着火し、1分半程度気相燃焼が持続した。その後火炎が消えて RDF 表面から中心へと無炎燃焼が進行した。

このことから、本実験条件下における RDF の着火温度は 480°C 前後であるが、着火現象は熱分解ガスの濃度に依存し、昇温速度が大きいほど炉温が着火温度になった時の熱分解ガスの濃度が高くなるため、着火現象が顕著になるものと考えられる。

2.1.2 急速昇温の場合 RDF を炉温が 800°C に保持された空気雰囲気中の反応管の中間部に瞬時に投入すると、投入直後に着火し、4～5分後に表面火炎が消えて RDF 表面から中心へと無炎燃焼が進行した。

さらに、急速昇温の条件で空気雰囲気中の反応管に RDF を投入し、火炎の最も激しい時点(投入して2分後)に窒素でクエンチした RDF サンプルと、火炎がほとんど消えた時点(投入して4分後)に窒素でクエンチした RDF サンプルとの断面および表面の写真を Fig. 3 に示す。クエンチしたサンプルの断面の色(表面黒→中心黄色)から見ると、投入2分後のサンプルでは熱分解による炭化反応が芯まで進んでいるが、酸化による灰化反応がほとんど起こっていないことがわかる。このことから RDF の第1段階に起こる燃焼は揮発分が分解し表面で燃焼するものと考えられる。さらに、半径方向に炭化度の分布が見られたことから、ペレット状の RDF の熱分解反応が吸熱反応であるため、反応は熱移動に支配され、熱分解温度がペレット内各位置における温度より低い成分のみが反応するものと考えられる。投入4分後のサンプルを見ると、RDF の熱分解による炭化反応が芯まで進行し、表面に約1 mm 厚さの白い灰化層が生成していることから、この部分では固定炭素の燃焼反応が完結しているものと思われる。さらに、灰化層と未反応核との間に明確な界面があることから、第2段階の燃焼は酸素の粒内拡散が支配的になっていると思われる。

2.2 熱分解及び燃焼時における RDF の重量変化及び半径方向の温度分布

2.2.1 昇温速度の影響 10, 20, $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の各昇温速度で炉温を室温から 800°C まで上昇させた時の熱重量分析曲線を Fig. 4 に示す。横軸は炉温、縦軸は RDF の重量残存率を表わす。RDF の重量減少曲線の勾配の変化から RDF の減量過程を前後二段階に分けることができる。すなわち、減量開始から急速に4割程度にまで減量するまでの段階を第1段階とし、その後の緩やかな減量段階を第2段階とする。このような減量過程は前報で得られた粉碎

Fig. 4 Effect of heating rate on the weight loss of RDF pellet (in air)

した RDF の試験結果とも一致している (Narukawa, *et al.*, 1996 b). いずれの場合も、熱重量曲線の形状も各減量段階での重量残存率も昇温速度によらずほぼ同様となっている。しかし、各減量段階に対応する炉温域はかなり異なる。RDF の減量は炉温が約 150°C である時に始まり、残存率約 0.9 まで減小した後、急激な減量が始まりほぼ一直線に 0.4 まで減少して第1段階が終了する。その後緩やかな第2段階が進行する。2.1.1 に述べた熱分解ガスの放出及び固定炭素の燃焼現象の観察結果と Table 1 に示す RDF の組成とを合わせて考察すると、最初の減量は水分などの低沸点物質の蒸発によるもの、その後の急激な減量は主に熱分解反応によるものと推定できる。この段階に対応する平均炉温は昇温速度が 10, 20, $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の場合にそれぞれ約 360°C , 400°C と 480°C である。このことから、昇温速度の増加に伴い、第1段階の炉温領域は高温領域へ移行することがわかる。これは、RDF の第1段階における重量減少が主に熱分解温度に支配され、後述する RDF 内部の温度分布に起因すると考えられる。

同一条件下の実験で得た RDF の重量と内部温度の経時変化を Fig. 5a, 5b 及び 5c に示す。二段階のいずれにおいても RDF の表面から中心に向かって温度勾配が存在する。しかし、その温度勾配は第1段階と第2段階とでは異なり、第1段階では RDF の表面と内部はともに温度が炉温より低く熱が外から中心へ向かって移動する。なお、温度勾配は炉温の上昇速度が大きい程大きくなる。ある時点から RDF 内部の発熱反応のために、RDF 表面から中心にわたって温度が急速に上昇して炉内雰囲気温度を越えるため、熱移動の方向が逆になって第2段階に入る。第2段階の初期では RDF の表面温度は小さいピークを生じた後、直ちに雰囲気温度と一致する。そのピークの大きさは炉の昇温速度が増加することによって増大する。RDF の内部温度変化は炉の昇温速度にかかわらず非常に類似したパターンとなっている。すなわち、RDF の半径の中点温度 (T_m) と RDF の中心温度 (T_c) の曲線はともに RDF の第2段階減量の初期で急上昇し、同段階の半ばで一旦安定になった後、末期で再び上昇して $1,000^{\circ}\text{C}$ 以上のピークを示している。このことは、RDF 内部における発熱速度が熱移動速度よりかなり大きいため、熱が内部に蓄積されるものと考えられる。

また、この RDF 内部温度の急上昇が、ストーカー炉燃焼の際に条件によっては灰が溶融状態となることの一つの原因と考えられる。

RDF を 800°C の高温ゾーンへ瞬間的に移動させた急速昇温実

Fig. 5 Effects of heating rate on the weight loss and temperature profiles of the RDF (in air)

験の結果を Fig. 5 d に示す。急速昇温の場合、第1段階での RDF の重量減少は RDF が高温ゾーンに投入された直後に始まり、約 3 分後には終了する。表面温度は設定した炉温 (800°C) よりかなり高い値へ急上昇し、表面と内部の間に 400°C 以上の大きな温度差を生じる。第2段階ではこの段階の初期において表面温度が

1,000°C 以上の最大値を示した後ほぼ一定値となる。内部の温度変化はほぼ低速昇温実験のパターンと一致している。

2.2.2 ガス中の酸素濃度の影響 これまでの実験結果は燃焼ガスとして空気を使用した場合の結果であるが、流動層燃焼炉においては、RDF が酸素濃度の低い濃厚相内で燃焼するため、こ

Fig. 6 Temperature profile and weight loss curve of the RDF pellet instantaneously placed to the reaction zone at 800°C (10% O₂)

ここでは、雰囲気酸素濃度を変化させて燃焼試験を行った。

Fig. 6 には、急速昇温条件における温度分布に対する酸素濃度の影響を示す。酸素濃度が 10% と低い場合には、RDF の表面温度と内部温度はともに第 1 段階で急速に上昇するが、表面と内部との間には大きな温度差が見られる。表面温度は炉温の 800°C に達した後一定に維持される。内部温度も第 2 段階では緩やかに上昇し、炉温より若干高い温度でほぼ一定値となり、Fig. 5 d に示す空気の場合のような大きな温度ピークは観測されない。これは、酸素濃度の低下により発熱反応が抑制されて、発熱速度と熱移動速度とがほぼ等しくなり、熱の内部蓄積が生じなくなるためと考えられる。このように、流動層炉の場合には、第 2 段階の反応速度が抑制されるため、ストーカー炉に見られるような、RDF 内部における温度の急上昇は起こりにくいものと思われる。

結 言

RDF 単一ペレットの燃焼特性を明らかにするとともに、ストーカー炉内と流動層炉内との RDF 燃焼特性の差異を説明するための基礎的知見を得るために、電気炉を用いて単一の RDF の重量減少と温度分布に対する炉の昇温速度と雰囲気中の酸素濃度の影響を検討した。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) RDF の燃焼は、粉末状の RDF と同じく揮発分の熱分解

とその後の固定炭素分から生成したチャー燃焼との二段階となる。

- (2) 第 1 段階の温度分布と反応の進行は雰囲気酸素濃度に関わらず、主に昇温速度によって支配される。低速昇温の場合には、RDF 内部の温度差は小さく昇温速度とともに上昇し、RDF の重量減少速度に対しては熱分解反応速度が支配的となる。一方、急速昇温の場合には、RDF 内部の温度差がきわめて大きく、RDF の重量減少速度に対しては伝熱速度が支配的となる。
- (3) 実験に使用された RDF サンプルの空気中の着火温度は 480°C 前後である。
- (4) 第 2 段階の温度分布と反応の進行は、雰囲気酸素濃度の影響を強く受け、酸素濃度が高いほど反応熱が RDF の内部に蓄積して、高い温度ピークを示す。

[謝 辞] 本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「アジア地域の環境保全」研究プロジェクトとして行ったものである。

Literature cited

- Cozzani, V., C. Nicoletta, L. Petarca, M. Rovatti and L. Tognotti; "A Fundamental Study on Conventional Pyrolysis of a Refuse-Derived Fuel," *Ind. Eng. Chem. Res.* **34**, 2006-2020 (1995 a)
- Cozzani, V., L. Petarca and L. Tognotti; "Devolatilization and Pyrolysis of Refuse Derived Fuels: Characterization and Kinetic Modeling by a Thermogravimetric and Calorimetric Approach," *Fuel*, **74**, 903-912 (1995 b)
- Hachiya, N., T. Kita, H. Kamiya and M. Horio; "RDF Combustion Characteristics in Fluidized Bed," *Nihon Energy Gakkaishi*, **76**, 980-987 (1997)
- Mieken Kogyocho; "Investigation on Environmentally - Friendly Energy Community," Report of the New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO-NP-9405 Tokyo, Japan (1995)
- Narukawa, K., Y. Chen, R. Yamazaki, S. Mori, T. Hirama, H. Hosoda and Y. Fujima; "Refuse Derived Fuel (RDF) Combustion Characteristics in Circulating Fluidized Bed," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 1408-1414 (1996 a)
- Narukawa, K., H. Goto, Y. Chen, R. Yamazaki and S. Mori; "Combustion Characteristics of RDF," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 560-565 (1996 b)
- Wakayama, M., H. Takatsuka and Y. Fujima; "High Efficient Utilization of Waste Energy," Proc. of the 7th SCEJ Sympo. on CFB, p. 69-76, Tokyo, Japan (1994)

Combustion Characteristics of Single Cylindrical RDF

GUIQING LIU¹, RYOHEI YAMAZAKI¹, SHIGENOBU HATANO¹, YUKIHISA FUJIMA²
and SHIGEKATSU MORI¹

¹*Department of Chemical Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603*

²*Center for Integrated Research in Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603*

Key words: RDF, TGA, combustion, temperature profile, fluidized bed.

As an approach to waste treatment and energy utilization, refuse derived fuels (RDF) have been developed as an alternative fuel for power generation. Combustion tests of RDF conducted in fluidized bed combustors and stokers have shown significantly different combustion characteristics and air pollution emission levels. To explain the differences from the view point of reaction mechanism of RDF, the combustion characteristics of a single RDF pellet (20 mm in diameter and 40 mm in length) made from municipal solid waste are investigated in an electric heating reactor (53 mm in inner diameter and 1,000 mm in length). The weight loss and the temperature profiles of the RDF pellet were measured under two groups of heating conditions: constant heating rate condition and instantaneous heating condition.

It is found that the combustion of RDF progressed in two stages. In the first stage, volatile matters are decomposed and then burnt in gas phase, and the weight loss rate of RDF significantly depends on the heating rate. The temperature difference between the surface and the inner RDF is small and thermal decomposition is the dominant process under smaller heating rate. However, considerable temperature difference between the surface and the inner is observed, and the heat transfer in RDF is the dominant process under the instantaneous heating condition. The ignition temperature of the RDF used in this work is around 480°C. In the second stage, fixed carbon is burnt in the solid phase, and the weight loss rate and the temperature profile in RDF are strongly affected by oxygen concentrations in the ambient gas. At higher oxygen concentrations, the heat of combustion is accumulated in RDF so that a high temperature peak is observed.