Technical Paper

Gasification Characteristics of Municipal Solid Waste
in CFB GasifierShoichi OGAWA^{*1}, Shigeru SUZUKI^{*1}, Yoshiyuki BANDO^{*2}, and Masaaki NAKAMURA^{*2}

(Received February 25, 2002)

循環流動層型ガス化炉における都市ごみガス化特性

小川彰一^{*1}, 鈴木 茂^{*1}, 坂東芳行^{*2}, 中村正秋^{*2}

A circulating fluidized bed gasifier was developed to produce CO and H₂ gas from municipal solid waste (MSW). MSW was gasified by using air at 1,020-1,170K. Faultless operation of gasifier with shredded and dried MSW was continued. During operation, the relations of temperature in free board and air feeding rate with the gas composition and product gas flow rate were analyzed.

The equilibrium calculation of gasification with carbon discharge from gasifier was executed to estimate the crude gas composition. From the comparison between experimental data and calculated results, it was concluded that the product gas composition was determined mainly by water gas shift reaction under the conditions of temperature range of 1,020-1,170K and residence time of 5 seconds in the free board.

Key Words

Municipal solid waste, Gasification, Circulation fluidized bed, Equilibrium model calculation

1. 緒 言

一般廃棄物は国内で年間 5,000 万 t 以上排出されているが、最近、一般廃棄物をガス化して生成ガスを燃料に用いたり、H₂やCH₄を合成ガスとして利用する次世代の処理方法が検討されている¹⁾²⁾。

一般廃棄物を熱分解・ガス化させるには、ガス化炉を 820 ~ 1,170K 程度に昇温するが、現在多く検討されている昇温法は空気、酸素富化空気、酸素などを吹き込んで一般廃棄物の一部分を燃焼して昇温する部分酸化法である。

本研究で用いた循環流動層炉におけるガス化においても、空気による部分酸化法を採用した。本方法による熱分解・ガス化プロセスの設計や実用化を確立するためには、大型炉において取得した運転データが新たに必要である。

そこで、ガス化炉設計の知見を得ることを目的に、20t/d の実用規模の処理能力を有する循環流動層式ガス化炉を用いて、一般廃棄物のガス化を試みた。本研究では、空気比・温度などの操作因子と生成ガス量・ガス組成などとの関係を調べる

とともに、ガス化炉設計に必要な空間時間、生成ガス量、生成ガス組成、固体粒子排出量などについて調べ、その予測法についても検討した。

2. 実験および平衡組成計算

2.1 試 料

市中より収集した一般廃棄物（以後、都市ごみまたは MSW と言う）を約 30mm 以下に切断し、さらに水分が約 10wt% になるようにロータリーキルン式熱風乾燥炉にて乾燥した後、試料として試験に供した。乾燥後の都市ごみの工業分析、元素分析および灰分の組成分析結果を Tables 1, 2 および 3 にそれぞれ示す。都市ごみは、ガス化がおこなわれている石炭と比較すると、C, S が少なく、H, O が多い傾向を示す。また、Cl が存在するなどの特徴がある。

* 1 Environmental Research Laboratory, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 19 Natsushima-cho, Yokosuka-shi, Kanagawa 237-8555, Japan

* 2 Department of Chemical Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603, Japan

* 1 住友重機械工業 (株) 環境技術研究所
〒 237-8555 神奈川県横須賀市夏島 19 番地

* 2 名古屋大学大学院工学研究科
〒 464-8603 名古屋市中種区不老町

Table 1 Proximate analysis

Moisture	10.0
Combustible	71.8
(Volatile matter)	(60.6)
(Fixed carbon)	(11.2)
Ash	18.2

unit : wt%

Table 2 Ultimate analysis (combustible)

C	39.4
H	5.2
N	0.8
S	0.1
Cl	0.6
O	25.7 (balance)

unit : wt%

Table 3 Component analysis (ash)

CaO	5.5
SiO ₂	5.2
Fe ₂ O ₃	1.3
FeO	0.02
MgO	0.5
Na ₂ O	0.8
ZnO	0.03
Al ₂ O ₃	2.7
others	2.1

unit : wt%

2.2 実験装置および方法

(1) 実験装置

ガス化実験に用いた実験装置は都市ごみ処理量 20t/d (収集時湿基準) の連続実験ができるように計画、設置した。ガス化炉は Fig. 1 に示すように循環流動層式で、底部は逆円錐型をし、上方のフリーボードは内径 1,100mm、高さ 8,260mm の円筒型とした。フリーボード上部には固気分離用のサイクロンを接続し、灰分や未反応炭素からなる固体粒子をライザへ循環させるダウンカマを設けた。底部の逆円錐部には水冷式スクリュウフィーダを設け、都市ごみを炉内へ供給した。ガス化炉およびバグフィルタの底部にはスクリュウ式の固体粒子排出装置を設置し、炉底灰や飛灰の排出をおこなった。また、流動用および酸化用空気は逆円錐部とフリーボードに設けたノズルより炉内へ吹き込んだ。

(2) 実験方法

あらかじめ、全系を LPG 燃焼により暖気した後、石炭より製造した活性コークスを投入して空気にて着火し、目的の温度まで炉内を昇温した。その後、都市ごみの供給を開始し、同時に空気流量を濃厚層部約 330m³/hr (空気比約 0.22)、フリーボード部約 340m³/hr (空気比約 0.23) に調整して濃厚層部を 820 ~ 970K に、フリーボード部を 1,020 ~ 1,170K に保持しながら実験を進めた。濃厚層部は灰分排出孔やダウンカマなどの狭部が付帯するので、当箇所へ熱分解ガスが流入し、高沸点成分の付着に起因するチャーの閉塞が発生する危険が

Fig.1 Schematic diagram of MSW gasifier

ある。したがって、その対策を考慮して濃厚層部の運転温度を設定した。また、都市ごみ灰の軟化点が 1,370K 程度であるので、軟化点より 100 ~ 200K 低い温度においても粒子の凝集が始まる³⁾と懸念されたため、上限温度を 1,170K とした。また、実験中は外部よりガス化炉へ空気のみを吹き込み、水蒸気の吹き込みはおこなわなかった。

流動層内には珪砂などの投入はおこなわず、都市ごみに含まれる灰分や固定炭素からなる固体粒子を流動媒体とした。差圧計での観測によれば、これら流動媒体は主に底部の逆円錐部に存在し、Rhe 線図⁴⁾に基づく底部の空隙率 ϵ は 0.6 ~ 0.8 程度であった。

都市ごみは炉内に供給された後に、濃厚層部で急激に昇温・乾燥され、数ミリ秒以内で揮発分が脱揮され⁵⁾、ガス状の H₂O、CO、CO₂、H₂ およびタールと灰分、固定炭素を含む固体粒子 (チャー) に分解される。この時、急激な昇温および還元雰囲気での脱揮のために、固体粒子は高い反応性を持つチャーとなる⁶⁾。

チャーは循環流動層内を炉底、フリーボード、サイクロン、ダウンカマ、炉底と循環を繰り返し、その間にガス化が進行し、粒子径が減少していき、最終的にはサイクロンを通過して炉外へ排出される。その後、ガスクーラ (熱回収ボイラ) の後に設置したバグフィルタにて捕集され、底部より排出される。ここで得られた固体粒子 (灰分および未反応炭素) の質量分布 50 % 径は約 20 ~ 30 μ m であった。したがって、サイクロンの捕集効率に依存して固体粒子が上記した経路で循環する回数、すなわち、炉内に滞在する時間が変化してガス化の進行も変化する。

また、比較的大きな粒子径の固体粒子や都市ごみ中の金属、ガラス、陶磁器などの不燃物は炉底より排出した。

生成ガスは、サイクロンを通過させた後にガスクーラにて約 420K まで急冷し、必要な場合には煙道中に消石灰を吹き込み、脱塩、脱硫をおこなった。その後、生成ガスを焼却炉にて燃焼させ、さらに脱硝などのガス処理をおこない、NO_x、SO_x、ダスト濃度や都市ごみ特有の HCl、ダイオキシン類などが所定の排出基準を十分に満たしていることを常に監視しつつ、煙突より大気放出した。

ガス化炉より得られたガスを燃焼した燃焼排ガス中の HCl 濃度は、消石灰噴霧などの脱塩処理を施さない状態で 4 ~ 7

ppm (O_2 12 % 換算, 乾基準) と低い値を示した。HCl が低濃度であることは、従来の焼却炉と異なり、過熱器などの高温腐食に関して大きく異なる雰囲気である。一方、固体粒子中の塩素濃度は 0.025 ~ 0.034wt% と高く、投入ごみ中の塩素の約 3 ~ 4 % がガス中へ移行したに過ぎない。この理由として、NaCl などの無機塩素化合物に起因する HCl の生成が還元雰囲気のために抑制されたり、灰分中に含まれる Ca 化合物による脱塩効果が影響し、ガス中への Cl の移行が抑えられたと考えられる。

都市ごみを投入し、全系が定常状態に達したことを炉内温度、ガス組成変化で確認した後、バグフィルタを通過した一部ガスを分岐してガス組成の測定に供した。また、生成ガス流量、 H_2O 濃度も同箇所にて測定した。

2.3 平衡組成計算

都市ごみは紙、厨芥、木材、綿などの衣類が多く含まれるので、原料に基づく植物系の直鎖型の炭化水素が多い。そのため、都市ごみを熱分解して得られたチャーは、反応性が高く、石炭チャーでは遅くなる 1,020 ~ 1,170K においても反応速度は速い。そのため、ガス化炉設計上重要な生成ガスの発熱量を予測するのに、ガスの組成予測を平衡計算を用いて試みた。平衡組成計算では、モデル I と II の 2 ケースを実施した。モデル I は固定炭素排出量に排出条件を設けず、投入した炭素全量が反応可能であるとした。また、モデル II では、チャーのサイクロン捕集効率により決まる固定炭素の排出量を、予め実験にて求めた値とし、炉をバイパスする炭素として扱った。したがって、モデル II では、炉内で反応する炭素とバイパスする炭素に分け、実験値に基づいてそれぞれを定量化し、機械的な排出現象を平衡計算に反映させた。

ガス化生成物の平衡組成は、以下の仮定のもとで、ギブス自由エネルギー最小化法に従って求めた⁷⁾⁸⁾ (以後、平衡組成計算という)。

- 1) 固定炭素排出量は、排出条件を設けないモデル I と、排出量として実験値を用いたモデル II のケースに関して実施した。
- 2) 都市ごみ中の元素は Table 2 に示した C, H, N, O, Cl, S の 6 種とした。
- 3) ガス化剤に用いた空気の組成は、 N_2 , O_2 , Ar の 3 種とした。
- 4) 生成ガス中のガス種は CO , CO_2 , H_2 , H_2O , CH_4 , H_2S , HCl , NH_3 , O_2 , N_2 , Ar の 11 種とした。

また、計算の実行には市販の計算コード ASPEN PLUS を使用した。ASPEN PLUS による計算では、生成熱などの熱化学的データは JANAF の熱化学的性質表を用い、ガスは理想気体として扱った。

3. 結果および考察

3.1 実験結果

ガス化炉運転時のガスの炉出口温度 T_g 、生成ガス量 Q_{pro} および炉底とバグフィルタにて捕集された固定炭素重量を炉に

供給した全炭素重量で除した炭素排出率 C_{dis} の経時変化を Fig. 2 に示す。この間、都市ごみの供給量はごみの密度変動などが主因となって変化したため、ここでは炉内温度が 1,020 ~ 1,170K となるように、吹き込み空気量を調整して実験をおこなった。図から分かるように、都市ごみの密度、発熱量などの変動に対して温度はほぼ所定範囲内に保持することができた。

一方、平衡計算 (モデル II) の結果、吹き込み空気量 Q_{air} と生成ガス量 Q_{pro} の関係は 1 次式で表現できる。したがって、Fig. 3 に示すように、実験結果より 1 次式の係数を求めると Eq. (1) となる。

$$Q_{\text{pro}} = 1.45Q_{\text{air}} + 250 \quad (1)$$

また、実験結果における吹き込み空気量と生成ガス量の関係は、相関係数 0.96 で強い相関関係がある。

したがって、実機規模の 1/5 ~ 1/3 規模である 20/d 炉において、空気量と生成ガス量の定量的関係が高い相関で得られたことから、フリーボード径、サイクロン寸法、ダクト径、ガス化炉出口より後流の機器仕様など設計上重要な因子が信頼性高く決定できる。

約 1,120K、空気比約 0.45 の運転にて得られた生成ガスの組成例を Table 4 に示す。主成分は N_2 , CO , CO_2 , H_2 , CH_4 であり、他に測定された C_2H_2 , C_2H_4 , C_3H_6 , C_6H_6 , C_{10}H_8 らの炭化水素はいずれも 0.3vol % 以下であった。この時、投入された全炭素量のうち、ガス相で排出された炭素は 80wt%, うち CO_2 は約 51wt%, CO は約 37wt% であり、固相で排出された炭素は約 20wt% である。ガス化温度を上昇させるにしたがい炭化水素量は減少するが、ガス中炭化水素の主成分は CH_4 である。

*1: C_{dis} = fixed carbon discharge rate / total carbon feeding

Fig. 2 Operation data of gasifier

Fig. 3 Dependency of product gas flow rate on air injection rate

Table 4 Example of typical gas composition and net heat value of dry product gas

H ₂	11.2
O ₂	0.05
N ₂	61.0
CH ₄	3.2
CO	10.1
CO ₂	14.2
C ₂ H ₂	0.012
C ₂ H ₄	0.21
C ₃ H ₆	0.0016
C ₆ H ₆	0.035
C ₁₀ H ₈	0.00041
Net heat value	3.8 MJ/m ³ _N

unit: vol%, dry basis

Table 4 の例では CH₄ の炭素は炭化水素中の 83 % 以上を占め、また、CH₄ の発熱量 (低位) は炭化水素ガス発熱量 (低位) の 86 % 以上を占める。したがって、炭素量および発熱量から判断して、設計に必要な生成ガス量およびガス発熱量を予測する目的の本計算では、生成ガス中の炭化水素は CH₄ のみを考慮して平衡組成計算をおこなった。

生成ガス成分の利用面から考えて、ガス中の H₂, CO は重要な成分である。これら両成分の発生量の和と空気比の関係および炭素排出率 C_{dis} を Fig. 4 に示す。

空気比 λ が約 0.3 ~ 0.75, 炉内温度 1,020 ~ 1,170K の範囲における大型炉での実験では、MSW 単位重量あたり発生する H₂ と CO の和は空気比との間には強い相関は認められなかった。しかし、15-30kmol/t-MSW の間に分布した。また、炭素排出率 C_{dis} は、ガス化剤の空気を増加させるとともに、ほぼ単調に減少したが、約 0.8 の比較的高い空気比まで排出が継続される傾向を示した。空気比 λ と炭素排出率 C_{dis} の関係は相関係数 0.76 と比較的高い相関があり、Eq. (2) の回帰式で表現できる。

$$C_{dis} = -0.39 \ln(\lambda) - 0.086 \quad (2)$$

フリーボードを基準としたガスの空間時間 t_s (s) は、ガス流量をバグフィルタ通過後の流量 Q_{pro} (m³/s) で、ガス温度をガス化炉出口温度 T_g (K) でそれぞれ代表して近似的に算出する

Fig. 4 Effect of air ratio on CO, H₂ gas production and carbon discharge rate

と、4 ~ 6 s 内に分布し、平均値は $t_{s,ave} = 5.3$ s であった。

一方、固体粒子の炉内に滞在する時間は前述したように、フリーボードを通過した後にサイクロン、ダウンカマ、炉底と炉内を順次循環するためにガスの空間時間と異なり、十分にならないことが知られている。

3.2 計算結果

(1) 平衡組成計算 (モデル I)

炭素排出量に実験値を用いないモデル I に基づく平衡組成計算の結果を Fig. 5 に示す。平衡組成計算では、H₂ と CO の和は空気比が約 0.2 ~ 0.48 の領域では空気比の上昇とともに増加し、約 0.48 で最大値約 42 kmol/t-MSW を示し、その後、減少して $\lambda = 1.0$ においてほぼ 0 となる傾向を示す。

一方、炭素排出率 C_{dis} は空気比 λ が約 0.44 以下の領域では空気比とともに減少するが、0.44 以上の領域では $C_{dis} = 0$ となる。すなわち、熱力学的平衡論に基づく、 $\lambda = 0.44$ にて炭素 (グラファイト) の燃焼・ガス化が完了し、その後、 $\lambda = 0.48$ で CO と H₂ 量の和は最大を示すことがわかる。

Figs. 4, 5 に示すように、CO と H₂ の和に関して、実験結果とモデル I による平衡組成計算結果を比較すると、全域にわたって実験結果の方が小さい値を示し、 $\lambda = 0.48$ 付近では実験値は計算値の約 0.5 倍の値となった。また、モデル I 平衡組成計算では空気比 λ が約 0.44 で炭素のガス化が完了する傾向を示すのに対して、実験では固定炭素の排出は $\lambda = 0.75$ においても観察された。実験値とモデル I の計算結果が異なるのは、未反応炭素を含む固体粒子の排出量、すなわち、チャーの反応性とサイクロンの捕集効率が影響を与えるためと考えられる。

(2) 平衡組成計算 (モデル II)

都市ごみから生成される固体粒子の粒径が当初小さいと、わずかなガス化の進行でサイクロンでは捕集できない粒径に小径化して未反応炭素が排出される。そのため、サイクロンの捕集性能とチャーの反応性が重要な設計因子となる。

そこで、実験より得られた空気比 λ と未反応炭素の排出率 C_{dis} の関係 Eq. (2) を用い、炉をバイパスするチャーと、全量反応するチャーを定量的に分け、チャーの反応性とサイクロン捕集効率を反映させた計算 (モデル II) を実施した。

Fig. 6 にモデル II に基づく計算結果と、実験値を示す。図か

Fig. 5 Result of equilibrium calculation (MODEL-I)

Fig. 6 Comparison between results of experiment and equilibrium calculation (MODEL-II)

ら分かるように、実験にて得られた Eq. (2) の炭素排出率を導入すると、CO と H₂ の和の計算値と実験値は比較的よく一致することが分かる。

このことから、あらかじめ未反応炭素の排出率を予測できれば、設計に必要な生成ガスの組成を平衡組成計算にて予測できると考えられる。未反応炭素排出率の予測には、実験室にて得られるチャーの反応性と、サイクロンを内蔵した本装置による未反応炭素排出率との相関データを、性状の異なる各地の都市ごみに対して蓄積することが必要である。その結果、反応性を測定することで、相関データからサイクロン捕集性能を考慮した未反応炭素排出率が得られ、その排出率を用いて平衡組成計算にてガス化炉設計に必要な生成ガスの組成を予測できる。

3.3 反応の進行度

炉内において、チャーは表面の活性点 C_i を基点として反応中間体 C(O) を生成して Eq. (3)~(6) にしたがって O₂, CO₂, H₂O などのガス化剤によりガス化され、さらに気相反応の Eq. (7) が進むと考えられる。

すなわち、ガス化炉内では燃焼反応の他に

チャー表面反応

ガス化反応

が進むと考えられる。

その後、

シフト反応

によりガスの組成が決まると考えられる。

そこで、得られたガス組成を平衡論的に考察し、生成ガスの組成から反応の進行度を調べ、炉径、炉高を決定するガスの空間時間が適正かを検討した。

(1) 反応平衡値の比較

Eq. (8) のシフト反応、Eq. (4) の Boudouard 反応、ならびに Eq. (6) のメタン生成反応の平衡値とガス化温度の関係を Figs. 7~9 にそれぞれ示す。シフト反応は Fig. 7 から分かるように、ガス化した 1,020 ~ 1,170K の温度域では本計算値 (モデル II) および CO, CO₂, H₂, H₂O の均一 4 元素系平衡定数⁹⁾ とよく一致する。したがって、生成ガスの利用面から考えて重要な CO と H₂ は、ガス化炉出口において平衡状態にあると考えられる。このことから、ガスの空間時間は十分であり、生成ガス量とガス化炉の内径、高さに関する計画は適切であったと言える。

また、本実験では、ガス化炉出口にてガスを急冷して約 420K に降温しているにもかかわらず、平衡定数は炉出口ガス温度と対応した。これはシフト反応速度が 420K では 1,170K に比較して非常に遅いために⁹⁾、急冷した本実験では炉内温度の履歴を持ったものと推定される。

一方、Fig. 8 および 9 には不均一反応に関する平衡値の比較を示す。Fig. 8 から分かるように、温度を上昇させるために空気を供給すると、実験値、平衡組成計算 (モデル II) とともに平衡定数は小さく、温度依存性も小さい傾向を示す。この傾向は参考⁹⁾ に示した文献値⁹⁾ と異なるが、その理由として、文献値は C(s), CO, CO₂ の不均一 3 元素系の平衡定数であるのに対して、本計算では O₂ との反応、固体粒子の反応性、サイクロンの捕集性能を考慮したためと考えられる。

また、比較的高温域におけるガス化であるにもかかわらず、生成ガス中のメタンは 1 ~ 3vol% 程度測定された。Fig. 9 に示すように、モデル II 平衡組成計算結果と本実験および他の実験結果^{10) 11) 12)} を比較すると、プラスチックを含まない模擬ご

Fig. 7 Equilibrium constant for water gas shift reaction

Fig. 8 Equilibrium constant for Boudouard reaction

Fig. 9 Equilibrium constant for methane production

みの試験結果である須鎗ら¹¹⁾の結果を除くと、いずれも実験値の方が大きな値を示した。これは、都市ごみの場合には、紙、繊維などのセルロースやプラスチック類に高分子の炭化水素が多く含まれているために、それらの炭化水素が熱分解して低分子化した結果、 CH_4 となったと考えられる。そのために、メタン生成反応による生成を前提とした平衡計算より大きな値を示すと考えられる。

(2)CO 選択率

部分酸化法では、供給した酸素がガス化によって、より多く CO に転換することが重要である。そこで、酸素が有効に消費されているかを、CO 選択率 ($P_{\text{CO}} / P_{\text{CO}_2}$) を指標として調べた。

モデル II の平衡組成計算で求めた CO 選択率の値と実験値を Fig. 10 に示す。モデル II 平衡組成計算において、CO 選択率は、当初、温度が上昇するに従い高くなる傾向を示し、1,170K 付近 ($\lambda = 0.5$) で、ほぼ最高値の約 0.71 となり、その後ほぼ一定の値となる傾向を示す。図では省略したが、さらに空気を供給して空気比を $\lambda = 1$ に近づけると、当然、温度は上昇し続けるが CO 選択率は低下する傾向を示すと考えられる。本実験とモデル II の計算結果は比較的良好一致を示すが、両者とも CO 選択率は 1 を超えることはなかった。

Fig. 10 Effect of gas temperature on $P_{\text{CO}} / P_{\text{CO}_2}$ ratio

C をすべて CO にするときを基準ガス化とし、その時の空気量を基準空気量¹³⁾ とすると、本都市ごみに対する基準空気量は $0.9\text{m}^3\text{-air/kg-MSW}$ である。この空気量は空気比で表すと $\lambda = 0.23$ 程度に過ぎず、平衡計算による $\lambda = 0.23$ のガス温度は約 540K である。この温度は都市ごみのガス化には低く、さらに空気の供給が必要である。仮に、空気比 $\lambda = 0.5$ でガス化を行うとすると基準空気量の 2.2 倍の空気が必要となる。すなわち、基準空気量に基づいて考えると、都市ごみは常に燃焼側でのガス化となる。これに対して、石炭では（ここでは太平洋炭（平均値 $\text{CH}_{0.82}\text{O}_{0.4}$ ）を例にする）基準空気量が空気比 $\lambda = 0.36$ に相当し、十分な温度が得られると考えられる。また、空気比 $\lambda = 0.5$ でのガス化では基準空気量の約 1.4 倍の過剰空気で済むことになる。

このように、都市ごみでは固有の O/C, H/C に起因して、ガス化に適した温度まで昇温するのに過剰な空気の供給が必要なために CO_2 濃度が高くなり、CO 選択率の低下および高空気比下でも未反応炭素の排出が観測されたと推定される。また、1,000 ~ 1,200K では $K_p = (P_{\text{CO}_2} / P_{\text{H}_2}) / (P_{\text{CO}} / P_{\text{H}_2\text{O}}) = 1.37 \sim 0.69$ であるから、 $P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}}$ が 1 より大きい本実験では $P_{\text{H}_2} / P_{\text{H}_2\text{O}}$ が小さくなり、CO, H_2 濃度が低くなる傾向を示すと考えられる。

以上述べたように、20t/d 規模の実機規模に準じる大型循環流動層ガス炉において、チャーの反応性、サイクロン捕集効率に基づく未反応炭素排出率を考慮した平衡組成計算は、ガスの反応の進行度、CO 選択率、必要な空間時間など設計に必要な値を予測できると考えられる。

本実験結果は国内一地区の都市ごみを用いて得られた。そのため、前述したように今後は種々異なる都市ごみのチャー反応性とサイクロンから排出される未反応炭素の排出率の相関を整えていく必要がある。その結果、与えられた都市ごみのチャーの反応性を予め実験室にて調べることににより、相関データから未反応炭素排出率を知り、当排出率を用いた平衡組成計算にて実用規模のガス化炉設計に必要なデータを適切に予測できると考えられる。

4. 結 言

20t/d 処理規模の大型循環流動層式ガス化炉を用いて、ガス化温度を 1,020 ~ 1,170K, 空気比 0.3 ~ 0.75 の範囲に保って都市ごみのガス化実験を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 生成ガス量は吹き込み空気量と強い相関があり、空気量の約 1.4 倍の生成ガス量が得られる。
- 2) シフト反応は平衡に達している。したがって、温度分布、ガスの偏流などが考えられる実用規模の炉においてもガスの炉内空間時間は 5s 程度で十分である。
- 3) CO 選択率は 1 を超えない。これは、都市ごみ組成の O/C, H/C に起因していると考えられる。本都市ごみに対しては、空気比 0.42 ~ 0.5 において MSW 単位重量あたりの CO と H₂ 生成量の和が最大となる。
- 4) 都市ごみチャーの反応性、サイクロン捕集効率を平衡組成計算に組み入れるために、炭素排出率に実験値を用いたモデル II の平衡計算のガス組成は実験値とよく一致する。

記号説明

C_{dis} : 炭素排出率	
= 固定炭素排出量/供給全炭素量	[-]
(CO+H ₂) : 一酸化炭素と水素のモル数	[kmol]
h : フリーボード高さ	[m]
d : フリーボード内径	[m]
K_p : シフト反応 (Eq.(8)) 平衡定数	[-]
p_i : i 種ガス分圧	[atm]
Q_{air} : 供給空気量	[m ³ /h]
Q_{pro} : 生成ガス量	[m ³ /h]
T_g : ガス化炉出口ガス温度	[K]
t_s : 空間時間	[s]
$t_{s,ave}$: 平均空間時間	[s]
ϵ : 濃厚層空隙率	[-]
λ : 空気比	[-]

文 献 : References

- 1) Chopra, H., Gupta, K., Keating, E. L. and White, E. B., 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1, 377(1992)
- 2) Stahlberg, P., Kurkela, E., Filen, H. and Salo, K., Pyrolysis and Gasification, p.603(1989)
- 3) 上宮成之, 青木健一, 小島紀徳, 第 33 回石炭科学会議, 221 (1996): Uenomiya, N., Aoki K., Kojima N., 33rd Conference of Coal Science, 221 (1996)
- 4) Reh, L.; *Chemical Engineering Progress*, 67, 58 (1971)
- 5) Kovacic, G. J. and Knill, K. J., Combustion Modeling, *Scaling and Air Toxins* (ASTM), 18, 101 (1994)
- 6) 小島紀徳, 山下 敏, 古澤健彦, 化学工学論文集, 11, 735 (1985): Kojima, N., Yamashita, T., Furusawa, T., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 11, 735 (1985)
- 7) 小林光雄, 海保 守, 山下安正, 牧野三則, 戸田雄三, 木村英雄, 公害資源研究所彙報, 13 (3), 11 (1984): Kobayashi, M., Kaiho, M., Yamashita, Y., Makino, M., Toda, Y., Kimura, H., *Annual Report of National Institute of Advanced Industrial Science And Technology*, 13 (3), 11 (1984)
- 8) Oliver, R. C., Stephanou, S. E. and Baier, R. W., *Chem. Eng.*, 19, 121 (1962)
- 9) 日本化学会編, 化学便覧基礎編 II (改定 3 版) (丸善), p.334 (1984): Japan Society of Chemistry, Handbook of Chemistry (Maruzen), p.334 (1984)
- 10) 向井 孝, 釜野博臣, 齊藤四郎, 萬條和広, 広津 秀, 岸井敬次, 浅田信二, 川中 聡, 第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 II, 591 (1998): Mukai, T., Kamano, H., Saito, S., Manjou, K., Hirotsu, S., Kishi, K., Asada, S., Kawanaka, S., Proceedings of the 9th Annual Conference of The Japan Society of Waste Management Experts II, 591 (1998)
- 11) 須鎗 護, 箕浦忠行, 伊藤 正, 細田博之, 多田俊哉, 八十格, 第 8 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 II, 503 (1997): Suyari, M., Minoura, T., Ito, T., Hosoda, H., Tada, T., Yaso, K., Proceedings of the 8th Annual Conference of The Japan Society of Waste Management Experts II, 503 (1997)
- 12) 下平和佳子, 武田 豊, 藤原直機, 山本 学, 第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 II, 594 (1998): Shimotaira, K., Takeda, Y., Fujiwara, N., Yamamoto, M., Proceedings of the 9th Annual Conference of The Japan Society of Waste Management Experts II, 594 (1998)
- 13) 資源環境技術総合研究所, “サンシャイン計画研究成果報告書 一石炭ガス化の高効率化に関する研究一”, (1994): National Institute of Advanced Industrial Science And Technology, Report of Sunshine Project (1994)