



# コークス充填層における吹込み可燃物の ガス化・燃焼挙動

芝池 秀治\*・高宮 健\*・内藤 誠章\*2

Gasification and Combustion Behavior of Combustibles Injected into Coke Bed

Hideharu SHIBAIKE, Ken TAKAMIYA and Masaaki NAITO

**Synopsis** : From the viewpoint of preventing global warming and reducing maintenance costs, the reduction of coke consumption in the direct melting furnace for municipal solid waste is strongly called for. Accordingly, the authors have developed technology for injecting combustibles through the tuyeres of the direct melting furnace. This paper reports on the gasification and combustion behavior of combustibles injected into coke bed in a high-temperature combustion experiment.

The main results obtained are as follows:

- (1) Combustibles such as plastics, combustible dust and LPG injected through tuyeres gasify and burn with priority over coke even under the combustion conditions of a direct melting furnace that has no raceway space.
- (2) Combustible injection through tuyeres is effective in reducing the coke consumption in the direct melting furnace.

**Key words**: waste; melting furnace; injection; gasification; combustion; coke bed.

## 1. 緒言

一般廃棄物処理分野においては、最終処分場の枯渇化やダイオキシン等の環境問題が浮上し、対策プロセスとして、ごみのガス化溶融技術が注目を浴びている。この方式は、従来の焼却処理とは異なり、焼却灰を排出せずにスラグやメタルとして再利用可能な資材に転換できることと、ごみを直接燃やさず熱分解・ガス化してから燃焼させるため燃焼性に優れていることが環境対策に有効である。

ガス化溶融方式は、熱分解と溶融を一体で行う本報のシャフト炉式と、分離して行うキルン式や流動床式等がある<sup>1,2)</sup>。シャフト炉式である本報の都市ごみ直接溶融炉(直接溶融・資源化システム)は、炉下部において高温のコークスベッド層(コークス充填層)を形成して、安定溶融と還元雰囲気確保するとともに、ごみの熱分解・ガス化を促進している。この結果、高品質で有効利用可能なスラグとメタルを産出でき、さらに後段の燃焼室での完全燃焼を実現している<sup>3)</sup>。

このようなコークスの利点を維持しつつ、CO<sub>2</sub>環境負荷やランニングコスト削減のためにコークスを低減する研究をこれまで多段送風技術を中心に実施し、コークス使用量(ごみトンあたりのコークス重量割合)は5~6%に低減できたが<sup>4-6)</sup>、さらなるコークス使用量低減を図るため下段羽口からの可燃物吹込み技術開発に取り組んだ。可燃物と

しては細粒の廃プラスチックや溶融炉より発生する可燃ダストおよび燃料用ガス等が考えられた。

廃プラスチックについては、2000年に完全施行された容器包装リサイクル法により、さらに分別が促進されると考えられ、この一般廃プラスチックをサーマルリサイクルのみならず、ケミカルリサイクルとして有効利用することが重要であり、この視点から直接溶融炉での廃プラスチック羽口吹込みが考えられる。また、直接溶融炉の上部から排出される熱分解ガスには一部少量の可燃ダストが含まれるが、この可燃ダストは炭素源として有効であり、これを捕集し羽口から吹き込むことで、コークス代替機能を果たす可能性がある。さらに、直接溶融炉では後段にある燃焼室のパイロットバーナーに都市ガスを用いることもあり、このような燃料用ガスも吹込み可燃物の対象と考えられる。

羽口からの可燃物吹込みは高炉では微粉炭等で既に実施されているが、直接溶融炉ではレースウェイ空間がなく、また、常温送風のため燃焼状況が大きく異なると予想され、コークス代替効果等については確認が必要である。

本研究では、コークス充填層における羽口からの吹込み可燃物のガス化・燃焼挙動を調査し、都市ごみ直接溶融炉における可燃物羽口吹込みの可能性を検討する。

平成15年5月22日受付 平成15年7月17日受理 (Received on May 22, 2003; Accepted on July 17, 2003)

\* 新日本製鐵(株)環境・水ソリューション事業部 (Environment & Waterworks Solutions Division, Nippon Steel Corp., 46-59 Nakabaru Tobata-ku Kitakyushu 804-8505)

\*2 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp.)

## 2. 実験

### 2.1 試料および実験装置

本研究で使用した吹込み可燃物は、プラスチックと可燃ダストおよび液化石油ガス（以下LPGと称する）で、その性状をTable 1に示す。プラスチックについては、廃プラスチックの代用として、約0.7mmの細粒ポリエチレン $(-CH_2-CH_2-)_n$ を使用した。その低位発熱量は44 MJ/kgである。可燃ダストは直接溶融炉から実際に発生し捕集したもので、炭素35%、灰分56%、低位発熱量12 MJ/kg、平均粒径約60 $\mu$ mである。燃料用ガスとして使用したLPG（プロパン）の低位発熱量は46 MJ/kgである。

実験は、羽口から吹き込まれる可燃物のコークス充填層内でのガス化・燃焼挙動を調査するために、Fig. 1に示す高温燃焼実験装置<sup>7)</sup>（以下ホットモデルと称する）を用いた。

ホットモデルは扇形（90度で炉底半径600mm）の小型シャフト炉（高さは炉底より3000mm）で、羽口が2本あり、粉状の可燃物はテーブルフィダー方式で供給しN<sub>2</sub>搬送により、送風支管側壁部から挿入したランスを経由して炉内に吹き込まれる。また、ガス状の可燃物は、ポンペで供給しランスを経由して炉内に吹き込まれる。

### 2.2 実験方法

実験の手順としては、初めに粒径40~60mmの高炉用コークスをFig. 1のように充填し、窒素プラズマによる1600°C加熱送風と炉底ヒーター加熱を用いて不活性雰囲気下で炉内コークスを昇温させる。コークス充填層の初期高さは、炉内反応が十分完結する高さ（約1000mm）とした。

昇温は、窒素から常温送風に切り替える際、炉内コークスが燃焼する温度とし、ここでは羽口上50cm位置の炉体温度が約1000°Cに到達するまで予熱した。窒素を常温の酸素富化空気に切り替え、実験を開始するが、コークスの燃焼反応およびソリューションロス反応が定常状態に到達すると、コークス充填層上部から排出されるガス濃度はほぼ一定となる。定常状態の確認後、コークス単味での実験継続ないしは可燃物の羽口吹込みを開始した。炉内のコークス充填層の高さは機械式レベル計で測定し、コークス充填層上端から排出されるガスは、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>およびN<sub>2</sub>について連続測定を行った。

時々刻々変化するコークス充填層高さとその部位から排出されるガス成分値から、可燃物の吹込みに伴うコークス消費速度の変化とコークス充填層各位置での反応挙動を調査した。また、後段のベンチュリスクラパーで捕集したガス中ダストの分析値や、羽口上250mmの位置でプローブを挿入して測定した炉内温度より、吹込み可燃物の燃焼挙動を調査した。

送風条件はTable 2に示す直接溶融炉近似の条件である。

Table 1. Properties of combustibles.

		Plastic	Dust	LPG
Chemical composition (%)	C	85.6	34.5	81.8
	H	14.3	1.0	18.2
	O	<0.1	6.3	-
Ash(%)		-	55.9	-
Calorific value(MJ/kg)		44	12	46
Mean size(mm)		0.7	0.06	-

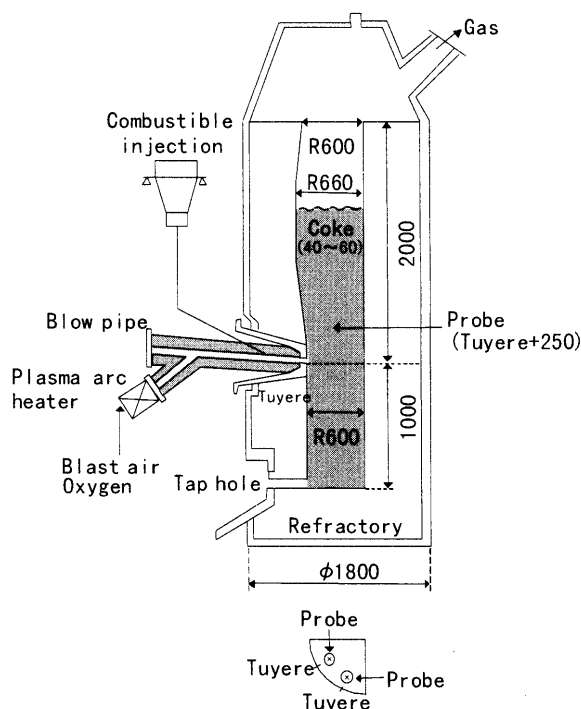


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus (Hot model).

Table 2. Experimental conditions of Hot model.

	Coke	Plastic injection	Dust injection	LPG injection
Blast volume(Nm <sup>3</sup> /h)	107	107	107	107
Oxygen(Nm <sup>3</sup> /h)	25	25	25	25
N <sub>2</sub> for feed(Nm <sup>3</sup> /h)	-	10	10	-
Blast Temperature(°C)	room temp.	room temp.	room temp.	room temp.
O <sub>2</sub> concentration(%)	36.0	33.4	33.4	36.0
Tuyere velocity(m/s)	25.9	27.9	27.9	27.9
Injection rate(kg/h)	-	20.0	70.0	19.6
Excess air ratio(-)	-	0.99	1.03	0.95

すなわち、常温送風し、酸素濃度は36~33%、羽口風速は26~28 m/sとした。この条件では羽口前にレースウェイ空間は形成されない。尚、可燃物の吹込み量は、可燃物の空気過剰率（空気比）が1.0程度となるように設定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 コークス充填層内におけるコークスの燃焼およびソリューションロス反応

定常状態となった時点でのコークス充填層内のガス組成変化を Fig. 2 に示す。この図は、時々刻々測定したコークス充填層高さ位置（羽口からコークス充填層上端までの距離）とその部位から排出されるガス組成をプロットしたものである。コークス充填層高さが 800~600 mm において、CO などのガス組成はほぼ一定の値を示し、炉内は定常状態に到達していることがわかる。

Fig. 2 によると、羽口から送風した酸素富化した空気は、羽口前で  $\text{CO}_2$  焼成 ( $\text{O}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2$ ) を生じ、酸素が存在する間は  $\eta_{\text{CO}}$  ( $= \text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$ ) は 100% で推移する。その後、酸素消失とともにコークスのソリューションロス反応 ( $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ ) が進行し、CO 生成反応に伴う  $\eta_{\text{CO}}$  低下が生じている。コークスのソリューションロス反応は吸熱反応であり、ソリューションロス反応開始温度以下になると反応が停止するため、コークス充填層の高い部分の  $\eta_{\text{CO}}$  は一定で推移することを示す。

#### 3.2 コークス充填層内における可燃物吹込み時の燃焼およびソリューションロス反応

可燃物羽口吹込み時のコークス充填層高さ位置とガス組成の時間推移の一例として、プラスチック吹込み時の結果を Fig. 3 に示す。コークス充填層高さが 380 mm の位置よりプラスチック吹込みを開始したが、コークス充填層の降下速度は徐々に低下している。また、プラスチック吹込み開始と同時に  $\text{H}_2$  濃度が急激に増加し、水性ガス化反応 ( $\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$ ) が進行していることがわかる。実験終了直前にプラスチック吹込みを停止すると、急激に  $\text{O}_2$  濃度が増加し CO と  $\text{H}_2$  濃度が低下して、 $\eta_{\text{CO}}$  はほぼ 100% に近い。すなわち、コークス単味では燃焼のみの領域であるが、プラスチック吹込みでは燃焼に加えソリューションロスや水性ガス化反応が進行していることを示す。

Fig. 4 にコークス充填層高さ位置の時間推移、すなわち、降下速度変化を、コークス単味の場合と 3 ケースの可燃物吹込みの場合を比較して示す。

コークス単味の場合は、羽口前でのコークス燃焼とソリューションロス反応によるコークスの消費で、コークス充填層高さは時間経過とともにほぼ直線的に低下する。一方、可燃物吹込み時には、コークス降下速度はコークス単味と比較して低下していることが認められ、可燃物がコークスの燃焼もしくはソリューションロス反応に代わって作用していることを示す。

また、コークスや吹込み可燃物の燃焼性を評価する指標として、炉内ガス中の  $\text{O}_2$  濃度がある。ガス中  $\text{O}_2$  濃度とコークス充填層高さの関係を Fig. 5 に示す。この図では、コークス単味の場合および 3 ケースの可燃物吹込みの場合

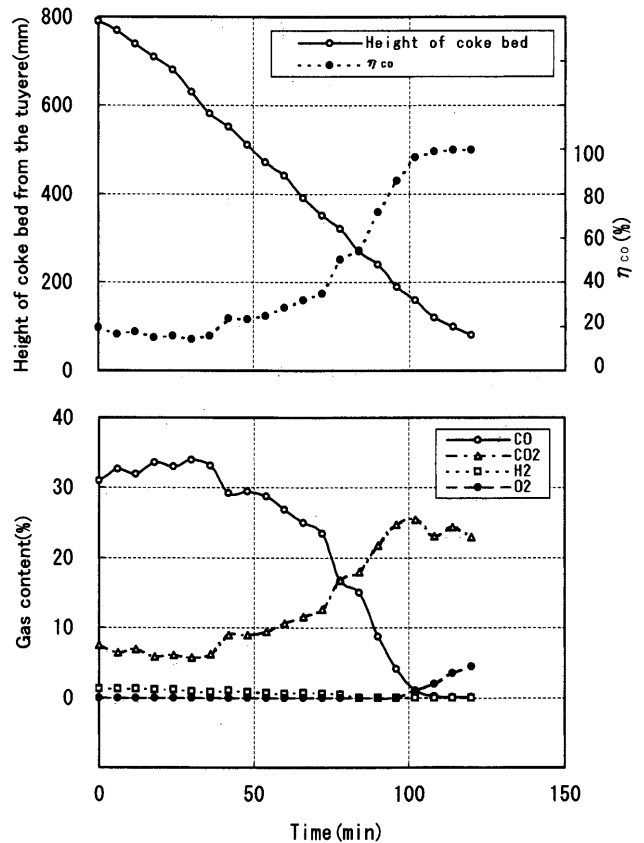


Fig. 2. Transition of gas content according to combustion and gasification in coke bed.

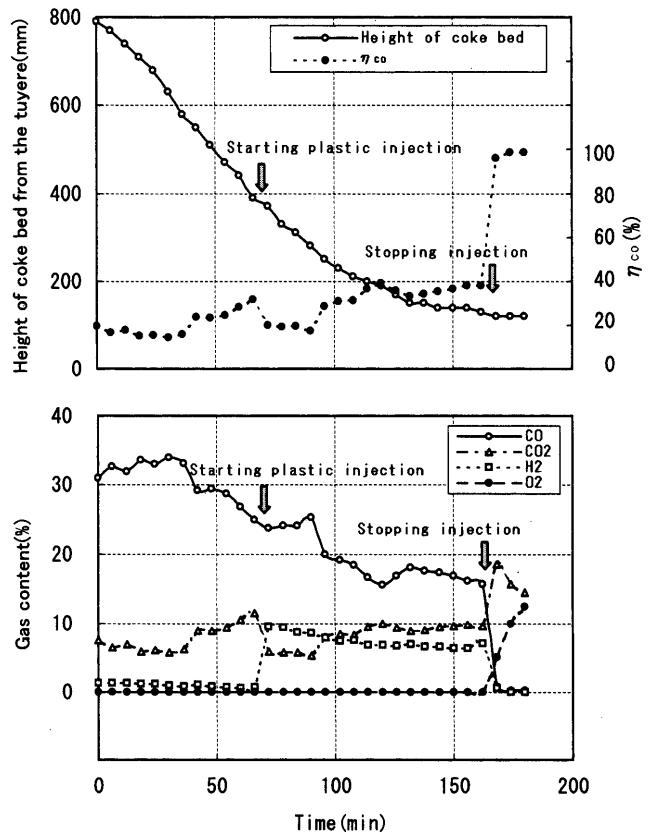


Fig. 3. Transition of gas content according to combustion and gasification in coke bed at plastic injection.

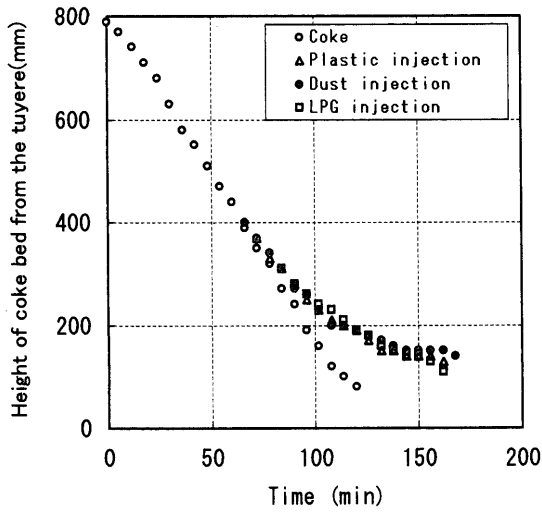


Fig. 4. Transition of height of coke bed at combustible injection.

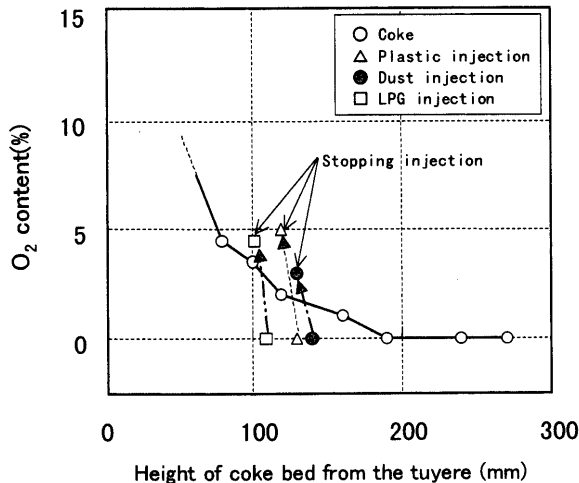


Fig. 5. Influence of combustible injection on combustibility in coke bed.

を比較して示している。

コークス単味の場合、コークス充填層高さが160mmで未燃酸素が検知され、このレベルが酸素消失位置と考えられる。一方、可燃物吹込みの場合は、プラスチックで130mm、可燃ダストで140mm、LPGで110mmのコークス充填層高さでも未燃酸素は検知されず、いずれも吹込み停止後に未燃酸素が検知された。

常温送風下でレースウェイ空間のない条件においても、可燃物の燃焼消費がコークスの燃焼消費に優先して進行し、少なくとも可燃物吹込み時の燃焼領域はコークス単味時に比べ羽口に近い。

Fig. 6 に可燃物吹込み時のコークス充填層内ガス濃度変化( $\eta_{CO}$ )を示す。

実際の都市ごみ直接溶融炉で想定されるコークス充填層高さが200~300mmまでの範囲で比較すると、可燃ダスト吹込み時の $\eta_{CO}$ はコークス単味と比べて10~20%程度低く、プラスチック吹込みの場合も、 $\eta_{CO}$ は20~40%程度低

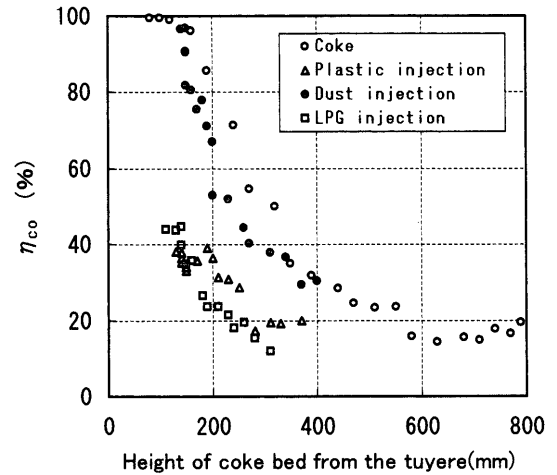


Fig. 6. Change of gas content in coke bed according to combustible injection.

下している。また、LPG吹込みの場合にはプラスチック吹込みよりさらに $\eta_{CO}$ は約10%低い。ソリューションロス反応は燃焼反応の終了後に生じることから、これらの知見は、可燃物吹込み時には、少なくともコークス単味に比べ、羽口近傍での可燃物の燃焼を促進するとともに、ソリューションロス反応速度も速いことを裏付けている。

### 3.3 可燃物吹込みによるコークス消費量削減効果

可燃物を羽口より吹き込む場合、その可燃物をコークス代替に有効に利用するためには、コークス充填層内でその大半を消費させることが最も効率がよい。コークス充填層高さ200~300mmの高さから排出される飛散ダストを炉後段の排ガス処理系のベンチュリスクラバーで採取し、その性状を調査した。炉外飛散ダストの量と成分より、羽口より吹き込んだ可燃物中炭素の炉内消費割合( $\eta_c$ (%))が(1)式より算出できる。

$$\eta_c = (1 - D_c / I_c) \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $D_c$ : 炉外飛散ダスト中炭素量 (kg/h),  $I_c$ : 吹込み可燃物中炭素量 (kg/h)。

吹込み可燃物中炭素の炉内消費割合を Table 3 に示す。炉外飛散ダスト量は、可燃ダストの場合、コークス単味と比較して増加しているが、炭素量では0.4kg/h程度と少ない。(1)式で求めた吹込み可燃物中炭素の炉内消費割合は、いずれのケースも95%以上であった。

これらのことから、羽口から吹き込まれる可燃物はコークスに対して優先的に燃焼ガス化し、コークス機能を代替できる作用があることが明らかとなった。

尚、可燃ダスト吹込みでは炉外飛散ダストの塩素濃度が高い。他の可燃物には塩素は存在しないが、都市ごみを処理する直接溶融炉から発生し捕集した可燃ダストには都市ごみ由来の塩類が存在する<sup>3)</sup>。この実験で使用した可燃ダストには塩素が5.2%あったが、コークス充填層内で塩類は揮発し、炉外へ排出される過程で飛散ダストに濃縮して

Table 3. Consumption rate of combustibles injected from the tuyere.

	Coke	Plastic injection	Dust injection	LPG injection
Amount of fry dust(kg/h)	1.96	1.13	6.63	0.40
Chemical composition of fry dust(%)	C	0.6	64.6	5.5
	Cl	0.6	0.6	14.4
	Ash	97.8	33.3	76.6
Amount of C in fry dust(kg/h)	0.01	0.73	0.36	0.08
Consumption rate of C in combustibles injected from the tuyere(%)	-	95.7	98.5	99.5

Table 4. Effect of combustible injection on coke consumption.

	Coke	Plastic injection	Dust injection	LPG injection
Coke consumption (kg/h)	46.3	23.1	18.5	20.5
Reduction rate in coke consumption (%)	-	50.1	60.0	55.7
Replacement ratio (-)	-	1.16	0.95	1.12

いる。この炉外飛散ダストの塩素量は 1.0kg/h 程度で炉内に吹き込んだ塩素量全体の約30%であるが、残りはベンチュリスクラバーの水と排ガスへ移行したと推察される。

次に、可燃物羽口吹込みによるコークス消費量削減効果を定量的に評価するために、Fig. 4 の実験結果で示したコークス充填層高さ変化からコークス消費量を求めた。その結果を Table 4 に示す。ここでは、コークス充填層高さ位置から炉内に残留するコークス量を求め、その変化量からコークス消費量を算出する。そして、コークス単味を基準として吹込み可燃物毎のコークス消費量削減効果を求める。また、吹込み可燃物中炭素と水素 1kg あたりのコークス中炭素と水素の削減量、すなわち、コークス中炭素と水素との置換率 (Z(-)) を (2) 式より求める。

$$Z = \Delta C / I_{C+H} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $\Delta C$  : コークス中炭素と水素の削減量 (kg/h),  
 $I_{C+H}$  : 吹込み可燃物中炭素と水素量 (kg/h)。

Table 4 より、コークス単味を基準として、各可燃物吹込みとも 50~60% コークス消費量が削減され、置換率は約 1 程度であった。この削減量は、コークス単味の場合の燃焼分 (65%) に概ね相当しており、吹き込んだ可燃物が、羽口前での燃焼コークス分を代替したことになる。

直接熔融炉では下段羽口からの送風は常温のため、良好なガス化・燃焼性を確保するには羽口から吹き込む可燃物は、炉内に到達後速やかに昇温されることが重要となり、固体については細粒化や比表面積が大きい方が望ましい。また、熱分解ガス化しやすい揮発分が多いものがよいと考えられる。このような観点では、ガス体の LPG が最も有利となるが、固体のプラスチックは、粒径は大きいものの

ほぼ 100% 揮発分であることが特徴であり、可燃ダストについては灰分が多く揮発分は 20% 程度であるが、粒径が小さいことが特徴である。これら 3 つの可燃物はこのような特徴があるものの、本実験結果では、ほぼ同様のコークス置換率が得られている。

尚、これは炉内にコークスのみが存在する場合の結果であるが、実際の都市ごみ直接熔融炉に可燃物吹込みを適用する場合<sup>8)</sup> は、灰分の熔融や還元状況等を考慮してコークス使用量低減効果を検証する必要がある。また、直接熔融炉に吹き込む可燃物の選択については、吹込み設備や可燃物購入コスト等の経済性評価も重要となる。

3.4 可燃物吹込み時の送風条件の検討

上述のように可燃物羽口吹込み時の炉内ガス化・燃焼挙動が明らかになったが、適正な送風条件について考察する。羽口上 250mm 位置よりプローブを炉内に挿入し、ガス温度を測定した結果を Fig. 7 に示す。

コークス単味の場合は、羽口上 250mm 位置のガス温度は 1400~1600°C レベルである。これに対して、可燃ダスト吹込みでは、ガス温度はほぼ同等の温度であるが、プラスチックや LPG 吹込みでは 1200~1300°C 程度まで低下する。

このような可燃物の羽口吹込みによる炉内ガス温度の変化は、都市ごみ直接熔融炉に羽口吹込み技術を適用する場合、熔融炉炉内で起こるごみの乾燥、熱分解・ガス化や熔融状況に影響を及ぼす。この炉内ガス温度変化は、特に、水素の含有量の多いプラスチックや LPG で大きく、この水素に起因するガス量の増加のためと考えられる。

炉内発生ガス増加量 (インプットガス中の dry 基準の N<sub>2</sub> 濃度/出口ガス中の dry 基準の N<sub>2</sub> 濃度 : N<sub>2</sub><sup>IN</sup>/N<sub>2</sub><sup>OUT</sup>) の

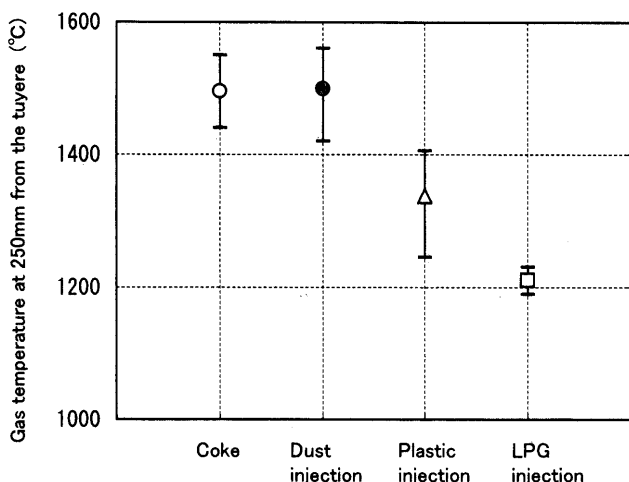


Fig. 7. Influence of combustible injection on gas temperature in coke bed.

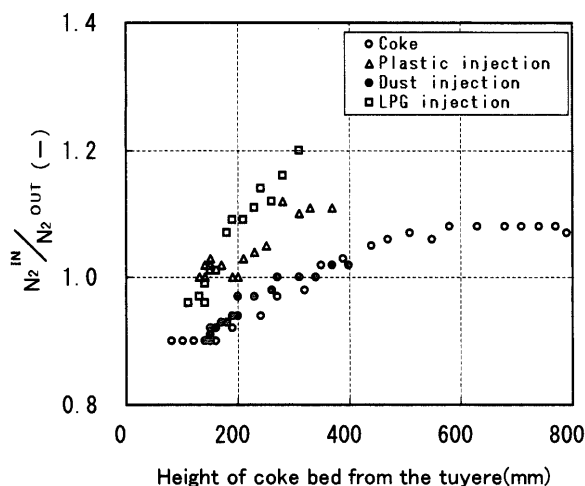


Fig. 8. Influence of combustible injection on gas volume.

変化を Fig. 8 に示す。水素含有量の少ない可燃ダスト吹込みの場合は、炉内ガス温度はコークス単味と同様であるが、これは発生ガス量がコークス単味とほぼ同等であることによる。一方、プラスチックやLPGは、コークス単味と比較して発生ガス量は増加している。これは、プラスチックやLPGの熱分解後の燃焼反応により生成するH<sub>2</sub>OガスとCが反応してガス量を増加する水性ガス化反応(H<sub>2</sub>O+C→H<sub>2</sub>+CO)が生じるためと推察され、その結果、炉内ガス温度が相対的に低下する。

このことから、プラスチックやLPGを羽口から吹き込む場合は、炉内ガス温度を一定にするためには、それぞれ送風酸素濃度を2.8%, 5.0%上昇させる必要がある。ただし、実操業適用時は酸素富化率増加によってランニングコストが上昇するため、3・3節で示した置換率や炉内ガス温度低下を考慮して、適正可燃物吹込み量や酸素富化率等の送風条件を設定することが望ましい。

#### 4. 結言

都市ごみ直接溶融炉条件のもとで、コークス充填層における可燃物羽口吹込みの高温燃焼実験を行い、以下の知見を得た。

(1) 羽口から吹き込まれる可燃物(プラスチック、可燃ダスト、LPG)は、レースウェイ空間のない直接溶融炉条件下でも、コークスに対して優先的にガス化・燃焼することが認められることから、可燃物羽口吹込みは、直接溶融炉でのコークス使用量低減に有効である。

(2) いずれの可燃物もコークス単味と比較して、コークス消費量は50~60%程度削減することができ、置換率も1程度を有しており、コークスとの代替燃料として機能している。

(3) 可燃物の種類によって、酸素濃度の調整が必要である。例えば、プラスチックやLPG吹込みの場合は、含有する水素に起因して発生ガス量が増加し、炉内ガス温度が相対的に低下することから、送風酸素濃度をそれぞれ2.8%, 5.0%増加させる必要がある。

#### 文 献

- 1) N.Hirayama: *J. Solid Liquid Wastes*, **29** (1999), 47.
- 2) Y.Nabeshima: *J. Jpn. Waste Management Association*, **53** (2000), 17.
- 3) H.Shibaike, M.Osada, K.Takamiya and M.Naito: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 252.
- 4) M.Shiraishi, K.Mori, H.Ono and Y.Ishida: *Proc. 5th Annual Conf. of Jpn. Soc. Waste Management Experts*, (1994), 343.
- 5) K.Kitano, Y.Tawara, Y.Ishida, H.Ono and M.Shiraishi: *Proc. 7th Annual Conf. of Jpn. Soc. Waste Management Experts*, (1996), 416.
- 6) K.Kitano, K.Murahashi, H.Shibaike, Y.Tawara and H.Ono: *Proc. 8th Annual Conf. of Jpn. Soc. Waste Management Experts*, (1997), 723.
- 7) K.Yamaguchi, H.Ueno, M.Naito and K.Tamura: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1609.
- 8) H.Shibaike, M.Osada, H.Tanaka and K.Takamiya: *Proc. 11th Annual Conf. of Jpn. Soc. Waste Management Experts*, (2000), 460.