

単一微粉炭粒子の燃焼特性

沈 峰満*・稲田 隆信*²・山本 賢作*²・岩永 祐治*²

Combustion Characteristics of Single Pulverized Coal

Fengman SHEN, Takanobu INADA, Kensaku YAMAMOTO and Yuji IWANAGA

Synopsis : In order to make clear the combustion behavior of pulverized coal(PC), the combustion characteristics of a single PC in the mixture of oxygen and nitrogen gases were measured by using the combustion apparatus equipped with CO₂ LASER, high speed camera, image analyzer and pyrometer.

The ignition time of PC was not dependent on the chemical composition of PC, but the burning time and the maximum volume expansion of PC was dependent. Therefore the burning time can be estimated from the composition of PC. The ignition time can be shorten with increase of the irradiating density of LASER, and the burning time can be shorten with increase of oxygen concentration in the mixture of oxygen and nitrogen. The burning time was not dependent on the irradiating density of LASER.

Key words : pulverized coal ; single particle ; combustion ; blast furnace ; LASER ; ignition time ; burning time ; expansion ; composition ; irradiating density ; oxygen enrichment ; pyrometer.

1. 緒言

現在、高炉において微粉炭吹き込み操作が盛んに行われているが、吹き込み量を増していく場合、微粉炭の燃焼率の低下に伴う操業上の障害が懸念される。このため、微粉炭の燃焼挙動に関する多数の研究がなされているが、その多くは、高温燃焼装置を用いたものである^{1)~3)}。しかし、微粉炭の燃焼率を上げる方策を検討する上で、単一粒子の燃焼過程に着目した研究も不可欠であると考えられるが、この観点からの研究は幾つか報告されているものの^{4)~6)}、ほとんどがミリオーダーあるいはそれ以上の粒径の微粉炭を対象としたもの⁵⁾⁶⁾であり、数十 μ mの微粉炭の燃焼挙動については不明の点が多い。

本研究では、ミクロンオーダーの単一微粉炭粒子の燃焼挙動に着目し、その燃焼特性の解明を目的とした。

2. 実験

2・1 実験装置および方法

実験装置の概図をFig. 1に示す。本装置は、CO₂レーザー光線の発生部分(最大出力値20W)、高速ビデオカメラ(毎秒6000コマ)と画像処理装置から成る観察部分、および応答時間0.1msの二色温度計を用いる温度測定部分の三つの部分から構成され、同期信号により動作するようシステム化され

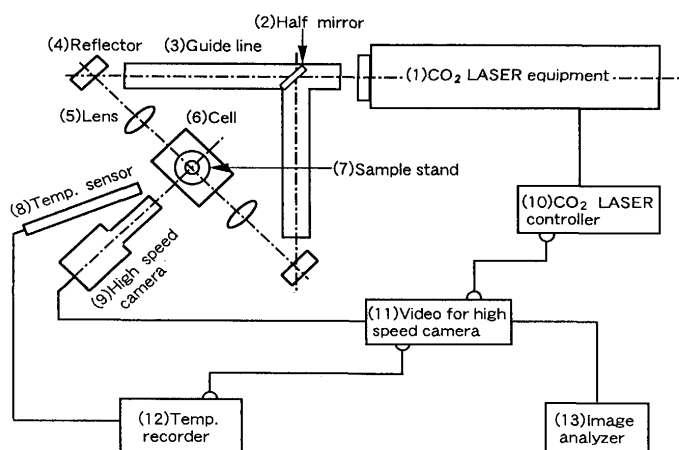


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus for coal combustion by CO₂ LASER.

ている。

実験は次の手順で実施した。単一微粉炭粒子を雰囲気調整可能なセルの中に設けた針状の試料置き台の先端に載せる。レーザー光線はハーフミラーで分光され、反射鏡により反射され、さらに集光レンズを通して、直径0.85mm ϕ のビームが粒子の両側(水平)から微粉炭を加熱する。また、燃焼挙動を高速ビデオカメラで撮影し、画像処理によって着火時間、燃焼時間および最大体積膨張率(これらの定義は第3・2節で詳しく記述する)を測定する。微粉炭粒子の温度経時変化も同時に測定される。一方、通光ラインでのレー

平成 5 年 3 月 31 日 受付 平成 5 年 10 月 8 日 受理 (Received on Mar. 31, 1993 ; Accepted on Oct. 8, 1993)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所(現:中国 東北大学) (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., now Northeast University)

* 2 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

レーザー光線の減衰を最小にするために、反射鏡、集光レンズおよびセルの通光部分には特殊光学材料(ZnSe)を使用した。

2.2 実験条件

実験は室温下でTable 1に示す条件を与えて行った。また、実験試料としてはコークスおよび揮発物(VM)の相異なる石炭の計17種類の微粉炭を使用した。Table 2に各種試料の工業分析値および元素分析値を示す。表には各試料の固定炭素(FC)および発熱量(Q)も示している。これら微粉炭を整粒して十分乾燥させた後実験に供した。

Table 1. Experimental conditions.

Atmosphere	air, P _{O2} /P _{N2}		
	P _{O2} /P _{N2}	(-)	15/85~60/40
Pressure		(MPa)	0.10
PC diameter		(μm)	75, 150
Irradiating energy density		(MW/m ²)	9.7~32.5

Table 2. Properties of pulverized coal.

Kind of PC	Approximate composition (mass%)				Elemental analysis (mass%)					Q (kJ/kg)
	V.M.	F.C.	Ash	FC/VM(-)	C	H	N	S	O	
PC-A	38.30	55.00	6.70	1.44	78.60	5.30	1.80	0.72	6.90	32100
PC-B	28.30	60.30	11.50	2.13	84.30	5.00	1.70	0.52	8.50	29910
PC-C	37.60	52.00	10.40	1.38	72.50	5.00	1.60	0.50	10.00	28800
PC-D	45.90	49.80	4.30	1.08	76.50	4.80	1.70	0.57	12.80	30100
PC-E	44.90	47.20	7.90	1.05	73.50	5.40	1.40	0.23	11.60	29100
PC-F	44.60	47.80	7.60	1.07	73.20	5.80	1.20	0.55	11.60	28200
PC-G	43.90	48.60	7.50	1.11	73.70	5.40	1.20	0.30	11.90	29500
PC-H	40.30	54.50	5.20	1.35	76.10	5.30	1.70	0.50	11.20	30700
PC-I	39.60	53.80	6.60	1.36	77.00	4.90	1.50	0.35	9.40	30300
PC-J	37.70	54.90	7.40	1.46	72.40	4.80	1.10	0.34	13.90	28500
PC-K	36.30	56.20	7.50	1.55	77.60	4.40	2.00	0.57	8.00	30100
PC-L	32.50	59.60	7.90	1.83	77.60	4.00	2.00	0.39	8.30	30400
PC-M	27.00	61.70	9.80	2.29	86.43	4.85	1.75	0.43	6.54	31000
PC-N	18.90	70.70	10.40	3.74	81.40	4.00	0.80	0.20	3.20	31700
PC-O	16.70	75.50	7.80	4.52	83.10	3.70	1.70	0.34	3.30	32200
Semi-Coke	3.70	85.30	11.00	23.05	-	-	-	0.56	-	-
Coke	0.20	88.20	11.60	441.00	-	-	-	0.55	-	-

V.M.:volatile matter
F.C.:fixed carbon
Q :calorific value

3. 結果および考察

3.1 微粉炭燃焼の像

大気中で単一微粉炭粒子の燃焼実験を行った際の高速ビデオカメラで撮られた代表的な燃焼状況をFig. 2に示す(図中、黒い台形状に見えるものは試料置き台であり、その先端部分に載せられているのが微粉炭粒子である)。微粉炭はレーザー照射(時刻0)後しばらく経て膨張が開始する(Fig. 2(3))。膨張の進行にともない気体が放出され、その後収縮して(Fig. 2(10)~(16))から着火し(Fig. 2(16))燃焼が始まる(図中、明るく見える部分が炎である)。炎の消えた後一定の残骸が残って燃焼が終わる。画像処理装置を用いて、着火するまでの粒子の水平投影の面積を測定し、球相当径を求めた。一例として、照射エネルギー密度が32.5MW/m²

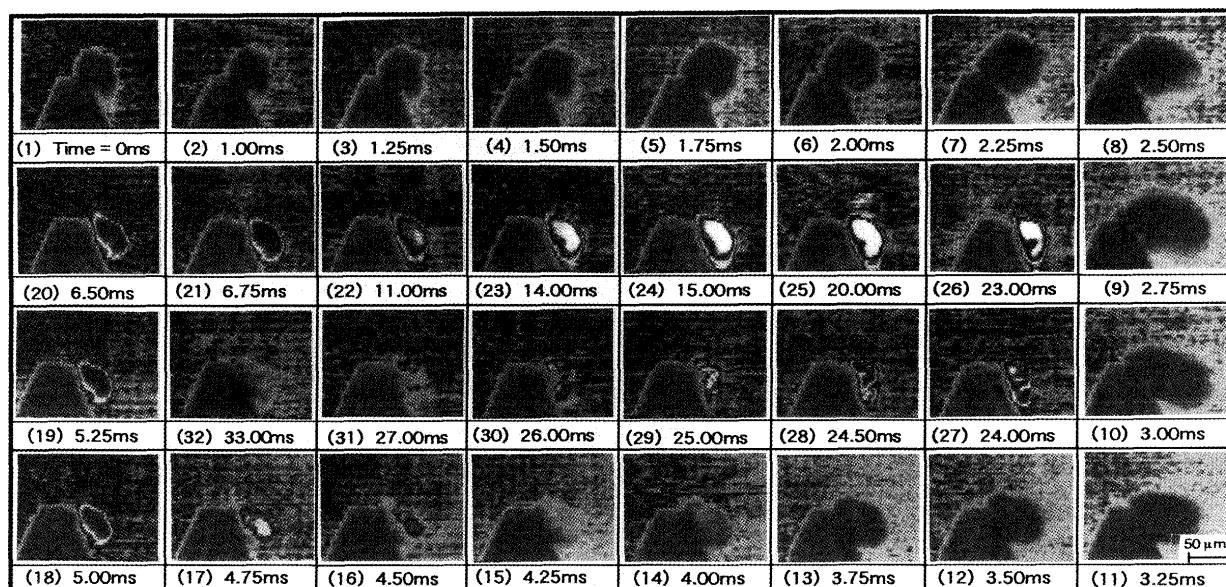


Fig. 2. Change in images of pulverized coal burning with time.

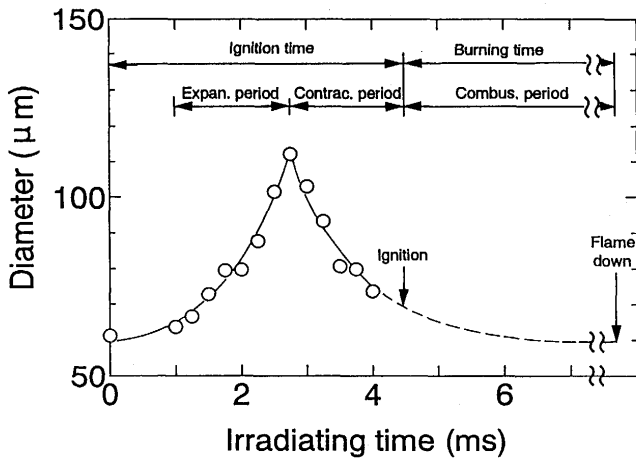


Fig. 3. Change in diameter of pulverized coal with irradiating time.

の場合に、得られた微粉炭粒子径の経時変化をFig. 3に示す。粒子径の変化に応じて微粉炭の燃焼過程を膨張段階、収縮段階および燃焼段階の三つの段階に分けることができる。

3.2 単一微粉炭粒子燃焼に関する燃焼特性の定義

本研究では、微粉炭の燃焼特性である着火時間、燃焼時間および最大体積膨張率を次のように定義する。

着火時間(t_i)はレーザー照射開始から炎が観察された時刻(着火)までの時間であり、燃焼時間(t_b)は着火してから燃焼が終了するまでの時間である。また、最大体積膨張率は最大膨張時点の体積と初期の体積との比をとって、次式で表す。

$$\eta(\%) = \left(\frac{V_{max}}{V_0} - 1 \right) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η は最大体積膨張率(%)であり、 V_{max} および V_0 はそれぞれ最大膨張時および初期の体積(m^3)である。

3.3 燃焼特性に及ぼす微粉炭組成の影響

3.3.1 着火時間に及ぼす組成の影響

粒子径約70 μm の微粉炭を、大気中、一定の照射エネルギー密度(32.5MW/ m^2)の条件下で燃焼させ、得られた着火時間と組成との関係を整理してFig. 4に示す。a)は着火時間に

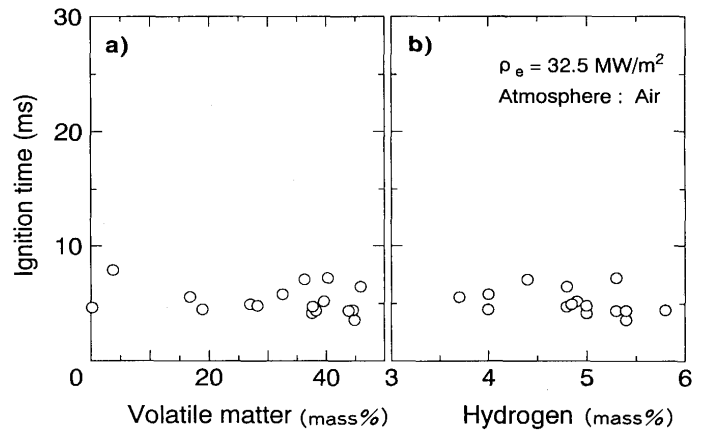


Fig. 4. Effect of component on ignition time of pulverized coal.

及ぼす揮発分, b)は水素含有量の影響をそれぞれ示す。着火時間が微粉炭の組成に依存せずにはほぼ一定であった。また、横軸に固定炭素、酸素、窒素などをとっていても同様な結果になることを確認した。このことは、微粉炭の着火が温度のみに依存することを示唆している。

3.3.2 燃焼時間に及ぼす組成の影響

前節と同じ実験条件下で、燃焼時間に及ぼす組成の影響を調べた結果をFig. 5に示す。横軸はそれぞれ固定炭素、揮発分および水素含有量を示しているが、燃焼時間は着火時間の場合と異なり、これらの組成に強く依存する傾向がみられた。各関係を最小自乗法で整理すると、次のような式が得られ、これらの式を用いて、燃焼時間の各組成に関する依存性を相対的に評価できる。

$$t_b = 1.6 \exp(FC/18.3) \dots\dots\dots (2)$$

$$t_b = 204 \exp(-VM/20.5) \dots\dots\dots (3)$$

$$t_b = 1002 \exp(-H/2.0) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、式中の t_b , FC, VMおよびHはそれぞれ燃焼時間(ms), 揮発分(%), 固定炭素(%)および水素含有量(%)である。

3.3.3 最大体積膨張率に及ぼす組成の影響

微粉炭の膨張については、Fig. 3に示しているように、膨

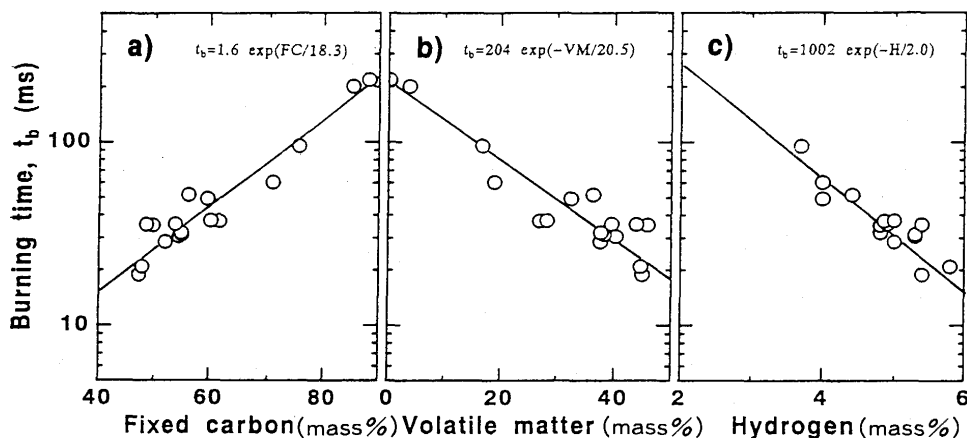


Fig. 5. Effect of component on burning time of pulverized coal.

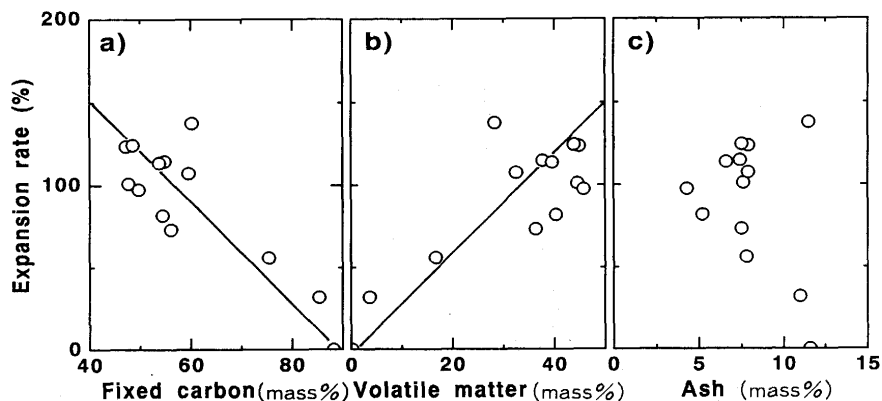


Fig. 6. Effect of component on expansion rate of pulverized coal.

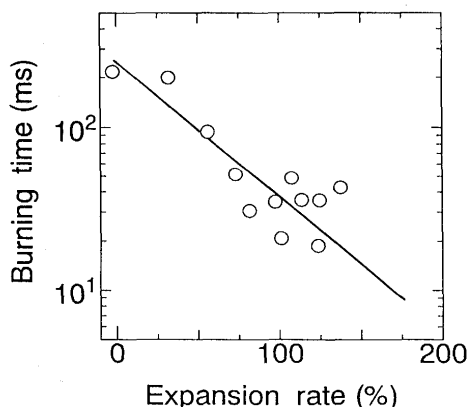


Fig. 7. Relation between burning time and expansion rate.

張時間がかなり短いため、従来の研究では、測定手段の制限から、定性的な表現にとどまり³⁷⁾、膨張率の評価にまでは至っていない。本研究では、高速ビデオカメラで撮られた像(0.25ms毎)を画像処理装置を使用して面積を測定した。また、球相当径を計算して(1)式から最大体積膨張率を求めた。Fig. 6に最大体積膨張率に及ぼす組成の影響を示す。データがややばらついているが、固定炭素に対しては負相関、揮発分に対しては正相関が得られ、そして灰分に対しては明確な関係が得られなかった。

さらに、膨張率と燃焼時間との関係はFig. 7に示すように、膨張率が大きいほど、燃焼時間が短くなることがわかる。これは、膨張挙動により微粉炭の反応面積が増加することが一因であるものと考えられる。

3・4 微粉炭燃焼の温度変化

3・4・1 二色温度計

温度計のセンサーとしては测温範囲770~2170KのLight pipe(日鉱計測システム製)を使用した。また、応答時間が0.1ms、温度分解能が0.1K、また、842~1263K温度範囲での最大誤差は4K以下である。

3・4・2 温度の経時変化

実測した代表的な温度変化のパターン(レーザー照射エネルギー密度32.5MW/m²)をFig. 8(a), (b)に示す。横軸は、下側が着火からの時間を、上側が照射開始からの時間をそ

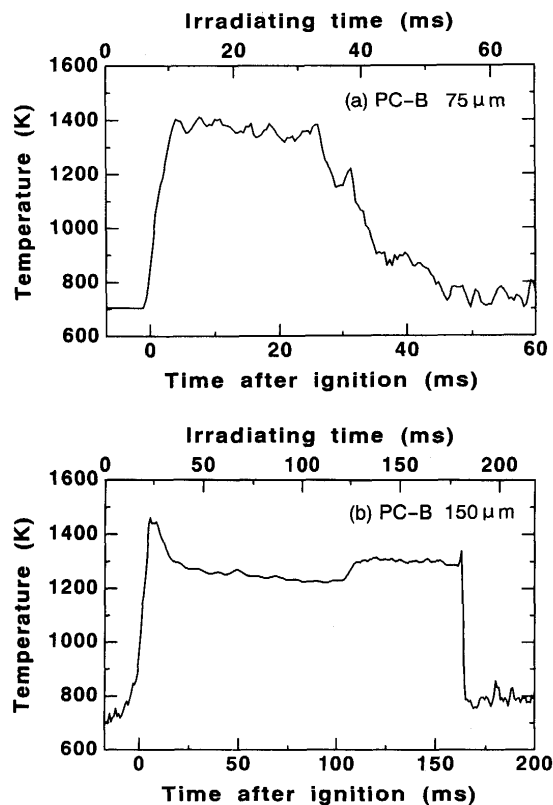


Fig. 8. Change in temperature with time.

れぞれ表している。着火までの温度が一定値を示しているのは、二色温度計の温度センサーには下限値が存在するためである。着火する前後に温度が急速に上昇し、着火後の数ms内に最高温度に到達する。Fig. 8の(a)および(b)は、それぞれフラットとピーク(着火直後および燃焼終了直前に高い温度ピークを示すこと)を有する2種類の波形を示す。これら2種類の燃焼状態を比較すると、Fig. 9に示すように炎の周辺あたりのイメージに差違が認められる。すなわち、ピークタイプ(Fig. 8(b))の場合、炎の周辺にはガス状のものがはっきり観察されるが、フラットタイプ(Fig. 8(a))の場合、このような現象が観察されなかった。しかも、同種類の微粉炭でも場合によって、フラットタイプあるいはピークタイプが観察される。また、図中に示す温度計測値から、①

Flat type	a)	b)	c)	d)	e)	f)
	0.0	2.0	4.0	26.0	33.0	37.0
Time after ignition(ms)	0.0	2.0	4.0	26.0	33.0	37.0
Temp. (K)	852.8	1187.1	1401.6	1383.3	1065.9	865.2
Double peaks	g)	h)	i)	j)	k)	l)
	0.0	4.0	10.0	35.0	106.0	161.0
Time after ignition(ms)	0.0	4.0	10.0	35.0	106.0	161.0
Temp. (K)	969.7	1327.1	1414.9	1254.8	1255.3	1285.4

Fig. 9. Comparison between two burning behaviors.

ガス状のものが見えるほど対応する温度が大幅に下がる(i)と(j)), ②写真(l)の炎が(k)より小さく見えるにもかかわらず, ガス状のものが少ないため, 高い温度を示していることがわかる。このようなガス状物質の発生の有無の原因, およびガス状物質発生時の実測温度低下の原因については, 今後さらに解明すべき課題と考えられるが, 前者については試料粒子の固体差に由来する要因の影響も考えられる。

3.4.3 微粉炭燃焼における温度の変化

照射エネルギー密度一定条件下で得られた, 膨張開始時, 膨張最大時, 着火時および燃焼終了時の各過程における温度, 最高温度, ならびに平均温度を炭種別でプロットした結果をFig.10に示す。図から, 各温度値はいずれの場合でも, 炭種に依存せず一定の値を示すことがわかる。膨張開始の温度は二色温度計の測定下限値700K以下, 膨張最大時の温度は約700k前後と判断できる。着火温度は約900~1000Kと測定され, 既報告の炭材の着火温度⁹⁾(無煙炭: 713~773 K, コークス: 710~873K)より高いが, 本実験の昇温速度

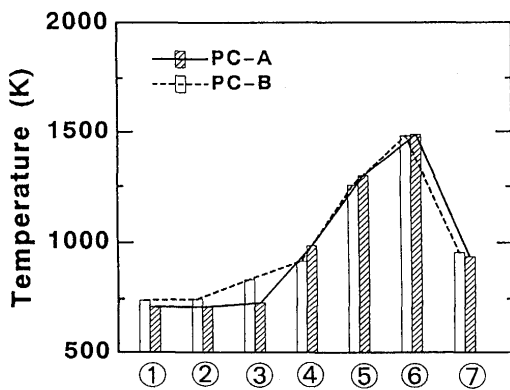


Fig. 10. Change in temperature during a single pulverized coal burning. At the time of ①start of irradiating, ②start of expansion, ③ maximum expansion, ④ ignition, ⑤ burning(average), ⑥ maximum temperature, and ⑦ end of combustion.

約100K/msの条件を考慮すると, 妥当な結果であると考えられる。

したがって, 前述したように着火時間が微粉炭の組成に依存せずほぼ一定の値を示したのは, どの炭種でも着火温度がほぼ同じ値であったためと推定される。

一方, 燃焼最高温度は約1400~1500Kであった。この値は, 幾つか報告されている微粉炭燃焼温度の測定値^{3)9)~11)}と比較すると大差ない。しかし, 高炉のレースウェイでの温度よりかなり低い値を示している。

3.5 実験条件の影響

3.5.1 雰囲気中酸素濃度の影響

0.1MPaの圧力条件下で, 酸素と窒素との混合ガス中の酸素濃度を15%から60%まで変化させ, 微粉炭の燃焼特性を測定した。得られた結果をFig.11に示す。酸素濃度が高くなると, 燃焼時間が短くなるが着火時間はほとんど変わらない。高炉操業において, 酸素富化, 加湿送風あるいは微粉炭と同時に粉鉱石を吹き込むことは酸素濃度を高める効果を与えるため, 微粉炭燃焼率を向上させる有効な方法と考

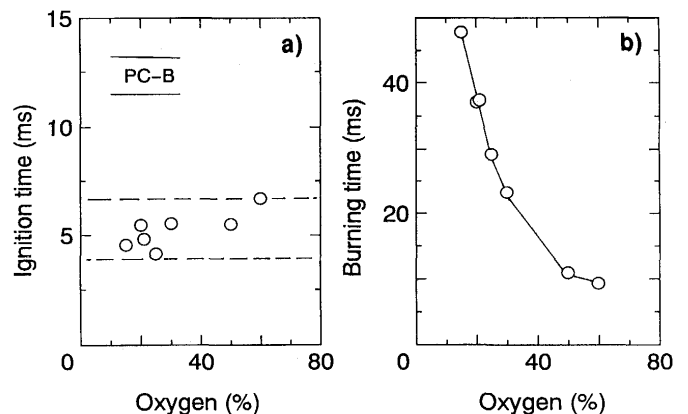


Fig. 11. Effect of oxygen concentration on ignition and burning time of pulverized coal.

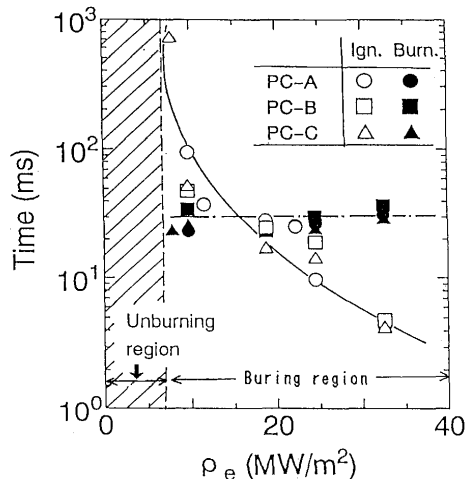


Fig. 12. Effect of irradiating energy density on ignition and burning time.

えられる。また、高压化は酸素の分圧を上昇させる効果があるので、微粉炭の燃焼時間を短縮させると考えられる。

3.5.2 燃焼特性に及ぼす照射エネルギー密度の影響

Fig.12は微粉炭の燃焼特性に及ぼす照射エネルギー密度 ρ_e の影響を示したものである。図中には、試料置き台からの熱損失の影響と考えられる燃焼不可能領域が存在しているが、これ以上の照射エネルギー領域においては、照射エネルギー密度を一定にすると、着火時間は炭種に依存せずに、ほぼ一定になった。燃焼可能領域で、照射エネルギー密度を大きくすると、いずれの炭種でも、着火時間が短くなり、燃焼時間はほとんど変化しないことがわかった。

照射エネルギー密度が大きいほど着火時間が短くなるのは、着火温度までの昇温時間が短くなるためである。したがって、高炉操業において送風温度を上げることは、微粉炭の燃焼率を向上する手段の一つであるといえる。

一方、照射エネルギー密度が変化しても、燃焼時間がほとんど変化しないのは、本実験条件下では微粉炭の燃焼が表面燃焼反応に律速されていないことを示唆する。さらに、酸素濃度が高くなると燃焼時間が短くなることを考慮する

と、燃焼が酸素供給に支配されているものと考えられる。しかしながら、燃焼メカニズム解明のためにはより厳密な検証実験が必要である。

以上の本実験結果に基づくと、高炉操業ではレースウェイの温度を高くしても、微粉炭の燃焼率向上のためにはあまり効果がなく、むしろ酸素供給を向上させる改善をしたほうが効果的と考えられる。

4. 結言

CO₂レーザー燃焼装置により、多種類の単一微粉炭粒子を燃焼させ、燃焼特性として着火時間、燃焼時間および最大体積膨張率を測定した。

(1) 着火時間は微粉炭の組成に依存しないが、燃焼時間および最大体積膨張率は炭種により変化する。

(2) レーザー照射エネルギー密度が高いほど、微粉炭の着火時間は短くなる。

(3) 雰囲気中の酸素濃度が高いほど燃焼時間が短くなり、照射エネルギー密度を変化させても燃焼時間が変化しない。このことにより微粉炭燃焼は酸素供給に律速されているものと推定される。

文 献

- 1) T.Suzuki, L.D.Smoot, T.H.Fletcher and P.J.Smith: Combust. Sci. and Tech., 45(1986), p.167
- 2) R.J.Tidona: Combustion and Flame, 38(1980), p.335
- 3) 上野浩光, 山口一良, 田村健二: 鉄と鋼, 78(1992), p.1206
- 4) 五月女友巳, 村田秀和, 斉藤正浩, 定方正毅, 佐賀井武: 第26回燃焼シンポジウム前刷集, (1988), p.218
- 5) O.C.Roberts and I.W.Smith: Combustion and Flame, 21(1973), p.123
- 6) K.W.Ragland and C.A.Weiss: Energy, 4(1979), p.341
- 7) 鈴木富雄: 燃料協会誌, 66(1987), p.378
- 8) 理科年表(国立天文台編), (1989), p.491[丸善]
- 9) 岩永祐治: 住友金属, 44(1992), p.26
- 10) D.Anson, F.D.Moles and P.J.Street: Combustion and Flame, 16(1971), p.265
- 11) 山本康之, 後藤勝治, 市丸広志, 成瀬一郎, 大竹一友: 化学工学論文集, 18(1992), p.643