

石炭の燃焼性評価手法の紹介

毛利 慎也*

Shinya Mouri

茂田 潤一**

Jun-ichi Shigeta

鈴木 孝平***

Kohei Suzuki

近年の微粉炭焚きボイラでは、発電コストの低減化およびエネルギー資源の有効活用の観点から、低揮発分炭などの多種の海外炭（低品位炭）の利用が進められている。海外炭は産炭地によって石炭性状が大きく異なり、燃焼性やNOx排出特性などに大きな影響をおよぼす。そのため、各使用炭種の燃焼性を精度良く予測することが炭種の選定や混炭条件を決定する上で不可欠となる。

低揮発分炭は従来から使用されている瀝青炭（揮発分35%程度の燃焼しやすい良質炭）に比べ、燃焼性が悪いという問題がある。そこで、石炭性状や反応管燃焼試験装置を用いた実験データなどから低揮発分炭を含めた幅広い石炭について燃焼性を予測できる手法を検討したので紹介する。

キーワード：石炭、燃焼性、低品位炭、燃料比、反応管燃焼試験装置、示差熱重量分析、灰分

1. はじめに

近年の微粉炭焚きボイラでは、発電コストの低減化およびエネルギー資源の有効活用の観点から、低揮発分炭のみならず高Ca炭、高S炭等の多種の海外炭（低品位炭）の利用が進められている。海外炭は産炭地によって石炭性状が大きく異なるため、燃焼性やNOx排出特性などに大きな影響をおよぼす。今後さらに使用される炭種の範囲が拡大する方向にあり、各使用炭種の燃焼性を精度良く予測することが炭種の選定や混炭条件を決定する上で不可欠となる。

特に、石炭焚き発電プラントの需要が高い中国

をはじめとするアジア諸国では、豊富に産出する低揮発分炭の発電への利用拡大が検討されている。低揮発分炭は従来から使用されている瀝青炭（揮発分35%程度の燃焼しやすい良質炭）に比べ、燃焼性が悪いという問題がある。そこで、石炭性状や反応管燃焼試験装置を用いた実験データなどから低揮発分炭を含めた幅広い石炭について燃焼性を予測できる手法を検討したので紹介する。

2. 反応管燃焼試験装置

試験装置の系統図を図1に示す。本試験装置は燃焼用ガス供給系、微粉炭供給系、電気炉（反応管）、サンプリング系およびガス分析装置により

* 石川島播磨重工業株式会社 技術開発本部 環境・化学開発システム部

** 計測事業部 化学環境部 次長 博士（学術）

*** 株式会社アイテック 技術グループ

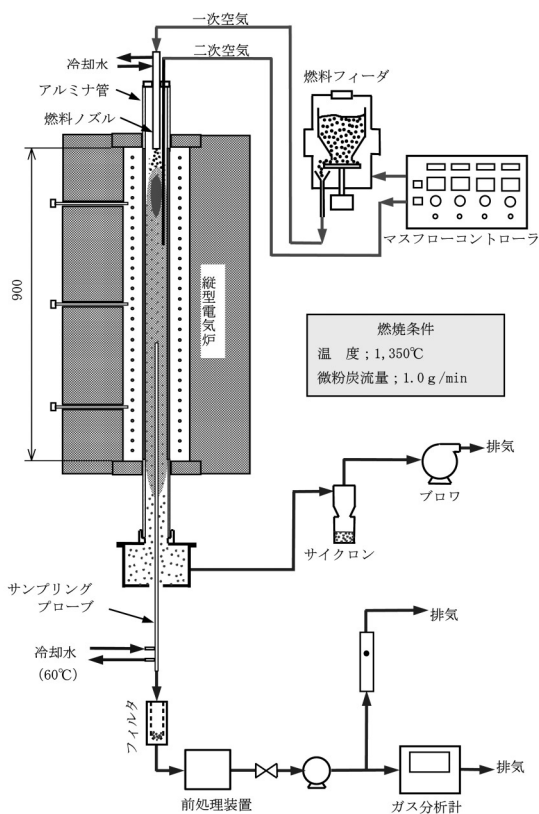


図1 反応管燃焼試験装置

構成される。燃焼用空気はマスフローコントローラにより流量調節し、微粉炭フィーダに供給する。

フィーダから供給された微粉炭は燃焼用ガスにより微粉炭ノズルに導入され、反応管内に噴出される。電気炉は全長1mの縦型シリコニット炉（最高使用温度1,600℃）で、長さ900mmの加熱部を有する。この加熱部の中心にアルミナ製の反応管外径50mm×内径42mm×長さ1,200mm）が挿入されている。

燃焼用ガスはO₂とN₂の混合ガスを用い、マスフローコントローラにより制御を行う。そのため、O₂濃度は任意に設定することができる。

燃焼ガスと灰のサンプリングには外径12mm、採取穴径4mmのサンプリングプローブを使用する。サンプリングプローブは反応管出口側（下部）から挿入し、上下方向の任意の位置でサンプリン

グできるようにしている。なお、採取した灰とガスは、灰をサンプリング管出口に設置したフィルタで捕集したのち、反応燃焼ガスは冷却除湿後、排ガス分析装置に導きNO_x、SO₂、CO、CO₂、O₂を自動計測する。本試験装置により石炭の燃焼性、排ガス性状を把握することができる。

燃焼試験は下記の条件で行った。なお、試験に供した石炭には低揮発炭6炭種（内5炭種は中国産）と瀝青炭2炭種を選定した。これら石炭の主要性状を表1に示す。

微粉炭流量：1.0 g/min

燃焼温度：1,350℃

空気比λ：1.20（-）

燃焼用ガス：空気ガス（21% O₂ + 79% N₂）

サンプリング点：

ノズルから150、300、500、800mm
（計4箇所）

表1 供試炭の性状

炭種	低揮発分炭A	低揮発分炭B	低揮発分炭C	低揮発分炭D	低揮発分炭E	低揮発分炭F	瀝青炭		
							A	B	
発熱量 cal/g	6,980	7,050	6,890	7,020	6,940	5,950	6,930	6,580	
工業分析	固有水分 %	1.4	1.7	1.7	2.7	1.7	2.7	14.2	2.6
	灰分 %	16.8	14.3	16.2	14.5	18.4	25.7	1.2	15.8
	揮発分 %	14.2	13.0	11.5	10.2	8.7	6.1	51.0	27.0
	固定炭素 %	67.6	71.0	70.6	72.6	71.2	65.5	47.8	54.6
	全水分 %	4.0	3.2	4.4	-	5.0	6.8	12.2	5.3
元素分析	燃料比 -	4.76	5.46	6.14	7.10	8.18	10.74	0.94	2.02
	炭素 %	74.7	77.1	75.1	71.2	74.7	67.2	72.3	70.1
	水素 %	3.6	3.9	3.3	4.2	3.8	2.6	5.2	4.3
	窒素 %	1.3	1.2	1.3	1.3	0.8	1.1	0.8	1.4
	酸素 %	3.2	3.2	3.5	6.5	1.9	2.3	20.4	7.8
	全硫黄 %	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.1	0.3
	燃焼性S %	0.2	0.1	0.3	0.4	0.1	0.4	0.04	0.2
不燃性S %	0.1	0.3	0.1	0.1	0.4	0.0	0.06	0.1	

3. 試験結果概要

(1) 示差熱重量分析

燃料の燃焼速度測定あるいは燃焼特性を評価する一手段として、示差熱重量分析による解析手法がある。示差熱重量分析（図2）により得られたバーニングプロファイルから微粉炭の燃

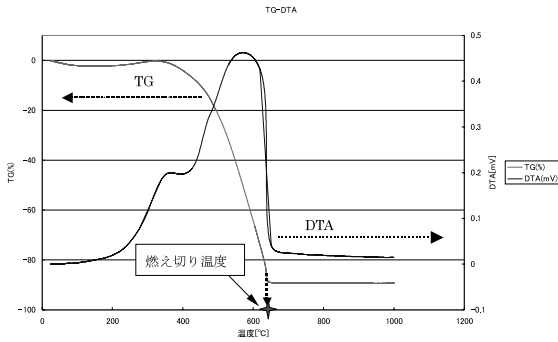


図2 瀝青炭Aの示差熱重量分析結果

え切り温度を求め、石炭の燃焼性を評価した。

図3に微粉炭の燃え切り温度と燃料比（固定炭素(%)／揮発分(%))の関係を示す。低揮発分炭の燃え切り温度は若干の幅があるものの石炭の燃料比との相関性が見られ、燃料比の増加に応じて高くなり、燃焼性が悪くなることが確認された。従って、示差熱重量分析の穏やかな燃焼（昇温速度20℃/min、実際の燃焼では数千℃/s）より、低揮発分炭から瀝青炭までの燃焼性は燃料比で評価できることがわかった。

(2) 反応管燃焼試験

示差熱重量分析での燃焼は緩慢燃焼なのに対し、反応管での燃焼は微粉炭の昇温速度が高速で、微粉炭へのO₂供給等のガス雰囲気も実機条

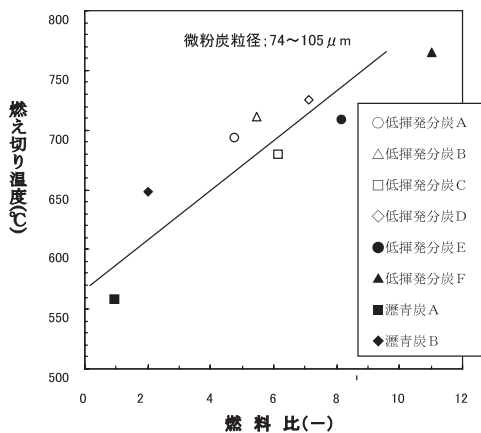


図3 燃え切り温度と燃料比の関係

件を再現しやすい特徴を持っている。

図4に石炭の燃焼率の経時変化を示す。なお、石炭の燃焼率 η (%)は、捕集した燃焼灰の灰分A₁ (%)の分析結果に基づき、灰分をトレーサーとして(1)式で求めた。瀝青炭2炭種は低揮発分炭に比べて、燃料率が高く燃焼性が優れていることがわかった。

$$\eta = (1 - A_0 / A_1) / (1 - A_0 / 100) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、A₀は供試炭の灰分 (%)である。

また、後述の未燃率Uc (%)は可燃分の何%が灰中に残留するかを示すもので(2)式の関係にある。

$$Uc = 100 - \eta \dots\dots\dots (2)$$

①燃料比

図5は燃焼試験で採取した灰中の未燃分と燃料比の関係を示す。未燃分は燃料比に対応して増加し、示差熱重量分析による評価と同様に相関性があることが分かった。

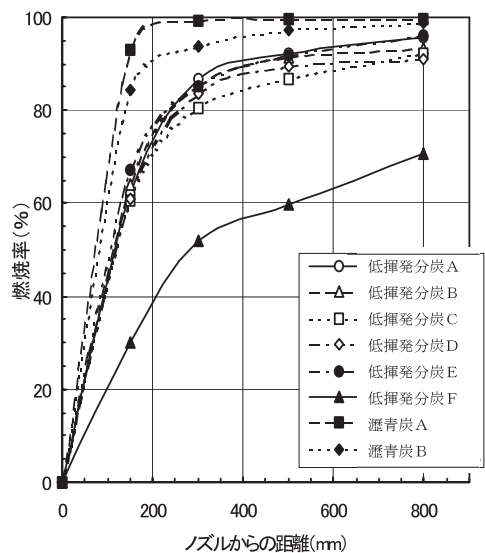


図4 燃焼過程における石炭の燃焼率変化

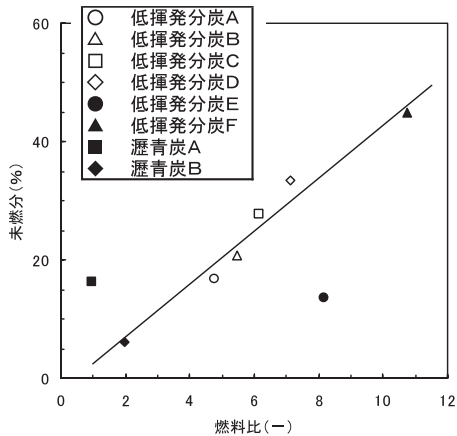


図5 灰中未燃分と燃料比の関係
(ノズルからの距離：800mm)

また、石炭の燃焼率で評価した結果を図6に示す。燃料比は石炭の燃焼性を評価するための重要な因子となることがわかった。

②NO_x発生特性

NO_x発生量は石炭中N分の影響を受け、N分が多くなるほどNO_x発生量が増加する傾向は見られるもののバラツキが大きく、相関性は小さいことから石炭中のN分からNO_x発生量を評価するのは難しいことがわかった(図7参照)。

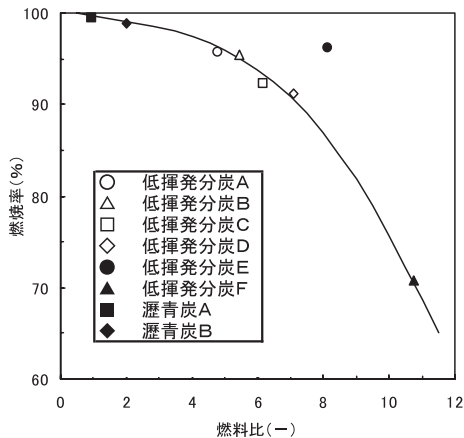


図6 燃焼率と燃料比の関係
(ノズルからの距離：800mm)

③灰分

低揮発分炭は灰分が多く、かつ、濃度幅が大きいいため、石炭の燃焼性は灰中未燃分と石炭の燃焼率の両面から検討する必要があると考える。

図8は各炭種の実測値とともに灰分をパラメータとして(1)式により求めた石炭の燃焼率と未燃分の関係を示したものである。本図にみられるように石炭の燃焼率が同じであっても未燃分は石炭の灰分によって大幅に変わってくる。燃焼率に灰分が少なからず関与することがわかった。

4. 燃焼性指標に検討

ボイラ運用上の燃焼性は灰中の未燃分(%)で評価している。そこで燃焼性指標として最も有効と判断された燃料比をベースとして多重回帰分析を行った結果、以下の予測式が燃焼性指標になるとの結論を得た。本指標は燃料比FR、石炭中灰分A₀(%)を因子として未燃分を予測する指標で、工業分析値から求められる燃料比を活用するものである。

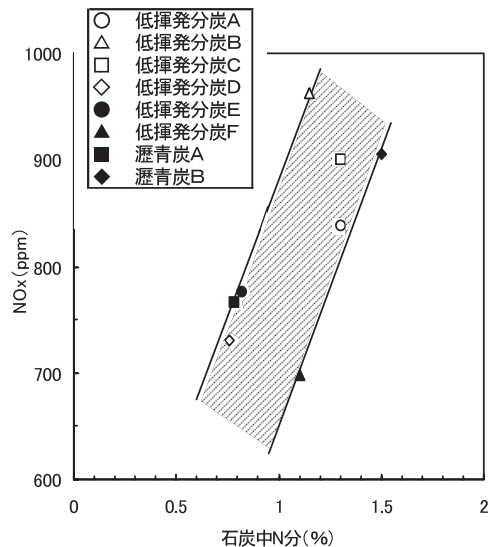


図7 NO_x濃度と石炭中N分の関係
(ノズルからの距離：800mm)

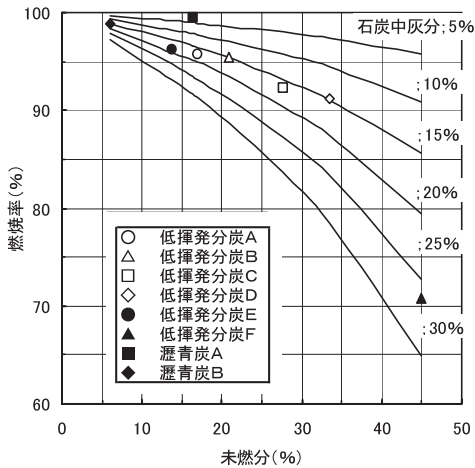


図8 石炭の年初率と灰中未燃分との関係
(ノズルからの距離：800mm)

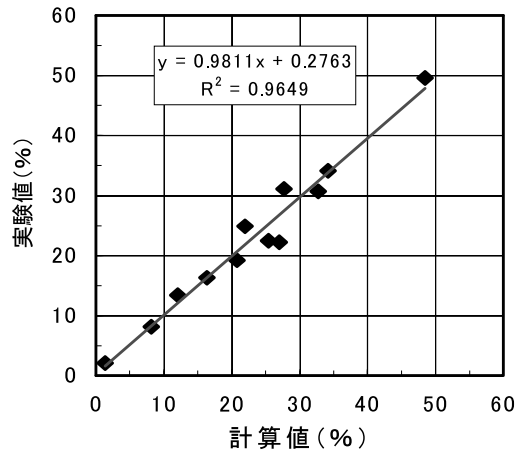


図9 未燃分の実験値と計算値の比較

$$\text{未燃分 } I_g (\%) = 35.25FR^{0.989}A_0^{-0.780} \quad \dots\dots\dots (4)$$

重相関係数 $R^2 = 0.948$

$$\text{未燃率 } U_c (\%) = 0.4213FR^{1.259}A_0^{0.1721} \quad \dots\dots\dots (5)$$

重相関係数 $R^2 = 0.982$

FR：燃料比

A_0 ：石炭中灰分%

なお、未燃分 I_g は (5) 式の U_c から以下の (6) (7) 式によっても求められる。

$$\alpha = (100 - A_0) U_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$I_g = 100 \alpha / (A_0 + \alpha) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(5) (6) (7) 式の計算値と実験値の関係を図9に示す。なお、実験値には表1の炭種のほかさらに4炭種分の実験データを加えた。

5. 終わりに

(1) 燃焼性の把握

- ・示差熱重量分析の燃え切り温度は、ほぼ燃料比に対応して上昇する。
- ・1kg程度の少ないサンプルによる反応管燃焼試験で、各種石炭の燃焼性を評価できる。

(2) 燃焼性指標の作成

燃焼性は燃料比との相関性が強く、燃料比と石炭中灰分から未燃分、未燃率を予測する式を導いた。

なお、今回紹介した反応管燃焼試験装置は石炭の燃焼性だけでなく、重質油燃料、バイオマス等の燃焼性評価はもちろん、装置内に灰付着プローブを挿入することにより燃焼灰の付着性評価試験にも幅広く活用できることを付記しておく。