β線透過法による空気輸送中の微粉炭濃度計測

今村 弘, 辻井純郎, 横大路 誠

(宇部興産株式会社中央研究所)

(昭和 36 年 12 月 8 日 受理)

緒 言

一般に粉体の空気輸送のように気体中に粉体が混入した系に関しては理論的にも、また、実際の計測管理の面でも未解決の分野が多い。たとえば、微粉炭燃焼方式の発電所ボイラやセメントキルンなどの場合、燃焼装置における一次空気中の微粉炭濃度を適当に保つことができれば燃料の燃焼効率の向上、あるいは、ボイラやキルンの運転管理上大いに役立つことと思われる。そして現実はこの微粉炭濃度の調整にはいろんな方法がとられているが、それぞれにむずかしい問題が含まれてくる。

そこで、これら燃焼装置の吹込管において直接微粉炭濃度を連続計測することを目的として、微粉炭濃度測定試験装置を試作して中間試験の結果、β線透過法による濃度測定の可能性の一端を見出した。厳密に粉体工学的立場から論ずれば本方法にも問題点はあるし、また、長期測定における計測器の安定性、空気密度の補正問題など今後の実験に負うべき点も多々ある。

放射線源の選定基準

微粉炭の流れる導管の直径方向にβ線源と検出器とを対向させて配置した場合の透過放射線量に関する特性関数は近似的に、

$$F = I_0 e^{-\mu_m \cdot x \cdot l} \quad (1)$$

I_0 : 微粉炭濃度 0 のときの透過放射線量

μ_m : 質量吸収係数 $[\text{cm}^2/\text{mg}]$

x : 微粉炭濃度 $[\text{mg}/\text{cm}^3]$

l : 導管内径 $[\text{cm}]$

となるが、この場合 x が実際の微粉炭燃焼装置における測定対象となる。いま、この x に対して最高の測定精度を得るようにするには、三輪¹⁾の設計理論によると $\mu_m \cdot x \cdot l = 1 \sim 2$ となるように $\mu_m \cdot x$ を選ぶのが望ましい。しかし l も大抵は微粉炭の燃焼技術上の面から制約をうけることが多い。そこで、実際に二、三の現場について調査した結果 $x \cdot l$ の値として大体 $15 \sim 35 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の範囲にあったので、これらの現場への応用を考慮して、 $0.03 \sim 0.13 \text{ cm}^2/\text{mg}$ なる μ_m をもったβ放射体を利用して研究を進めることにした。 μ_m は厳密には測定条件および質量、厚さによってもかなり変化するが、大体のところ R. D. Evance の μ_m と $E_{\max}$ (最大β線エネルギー MeV) の関係を示す実験式 $\mu_m = 0.022 E_{\max}^{-4/3} [\text{cm}^2/\text{mg}]$ から上記の μ_m に対応する $E_{\max}$ として $0.26 \sim 0.8 \text{ MeV}$ が算出される。したがって、この範囲の $E_{\max}$ を有し、しかも半減期が適当に長くて、かつ入手容易なβ放射体として ^{85}Kr (10.3 年: 0.666 MeV) および ^{204}Tl (4 年: 0.765 MeV) の 2 つを選んだ。

実 験

1. 実験装置*

Fig. 1 の装置はある濃度範囲の微粉炭を導管内に流せるように設計されている。すなわち、秤量用ホッパー (1) で微粉炭重量を秤ったのち、微粉

* 導管が上昇管と下降管からなっているのは、ほかに粉体工学上問題となる気流中の粉体の挙動を調べるためである。

Fig. 1 Laboratory equipment to circulate the pulverized coal and to measure the concentration of coal

- 1; weighing hopper 2; weigh bridge
 3; feeding hopper 4; rotary feeder
 5; conveying pipe 6; cyclon collector
 7; air lock feeder 8; storage hopper
 9; air pipe 10; turbo blower
 11; orifice
 12; difference pressure transmitter
 13; radiation source 14; radiation detector
 I~VI; location of measuring windows

炭を供給用ホッパー (3) に移す。ついで、ロータリーフィーダー (4) により一定割合で導管 (5) へ送り込まれた微粉炭は空気流に乗ってサイクロン (6) の方へ輸送され、サイクロンで分離回収される。一方、空気は風管 (9) を通ってターボブロワー (10) により排出されるが、この空気量は風管途中のオリフィス (11) で測定しており、さらに、オリフィス差圧は空電変換器 (12) により電圧に変換して連続記録できるようにした。

また、導管 (5) の壁に設けた透過放射線量測定窓 (I~VI) には β 線の吸収を少なくするためにナイロンフィルムを用いた。

2. 実験内容

導管内の微粉炭濃度を測定するには微粉炭の流れに乱れのないところを選ぶのが望ましいので、まず、Fig. 1 の装置概略図に示す 6 箇所の測定窓 (I, II, III, IV, V, VI) における流動状況を調べ、その結果からもっとも均一な流れをしている測定窓において濃度の測定を行なった。

β 線透過法による計測にさいして、とくに、この実験のように放射線通路の全域にわたって吸収体 (微粉炭) が分布する場合には散乱線が相当に影響して測定精度を低下することが予備実験の結果から推定されたので、濃度測定においては、まず、散乱線除去のための放射線通路のコリメーションの効果を調べ、つぎに、検出器として G-M 管と電離箱を使用したときの測定精度の比較を行なった。

結 果

1. 微粉炭の流動状況

微粉炭供給量および空気量を一定にして各測定窓における透過放射線量を測定した。Fig. 2 はその記録結果の 1 例であるが、その計数率変動には微粉炭流動のむらに放射線の統計動揺が合成されたものと推定できるので、その分だけ除いて流動むらのみに起因する変動率を求めた。その結果を Table 1 に示す。

Table 1 Counting deviation in % at each measuring window caused by uneven flow of pulverized coal on the cross section of the pipe

Observed point Radiation source	I	II	III	IV	V	VI
^{85}Kr	4.5	2.7	7.1	4.3	5.4	3.8
^{204}Tl	3.4	2.3	9.1	3.7	3.6	2.6

結局、微粉炭の流れにもっとも乱れが多いのは窓 III であるが、これはあきらかに上流側の曲管の影響によるものと考えられる。逆に、比較的均一な流れをしているのは窓 II および IV であること

Fig. 2 Charts about the flowing state of pulverized coal in the pipe at each measuring window (I~IV show the number of window) under the constant feed rate. Where, time constant of rate meter; 1 sec. range; 1,000 cps in full scale. concentration of coal; about 1.0 kg/m^3 of air. radiation detectors; halogen quenched G-M tubes. radiation sources; ^{85}Kr in upper charts and ^{204}Tl in lower charts.

がわかる。

2. 微粉炭濃度測定

Fig. 3 は 1.34 kg/m^3 以下の微粉炭濃度に対する透過放射線量を記録したチャートの一部である。なお、微粉炭濃度として、ここでは、ある時間内に測定点を通過する微粉炭量と空気量の重量

-体積比をとった*。実験は Table 2 に示す条件

* 放射線透過の原理からいえば、微粉炭濃度としては導管の単位体積内に含まれる微粉炭量をとるのが妥当である。ここでは、空気流速が $12 \sim 14 \text{ m/sec}$ の範囲で実験したが、さらに広範囲に空気流速がおよぶときには当然微粉炭との相対速度の補正が必要となろう。

Fig. 3 A part of the chart about counting rate of G-M tube to various concentration of pulverized coal in air

のもとに VI の測定窓で行なった。結果を Fig. 5 に示す。

さらに、微粉炭濃度 (x) と透過放射線量 (F) との関係を定量化するため回帰方程式を求めた*。その回帰方程式

$$F = e^{ax^2+bx+c} \equiv I_0 e^{-(a'x+b')x \cdot l}$$

と (1) 式の特性関数を比較すると吸収係数 μ_m は x の一次式で表わされる。これを Fig. 5 に示す。すなわち、 μ_m はコリメーションの状況や G-M 管と電離箱の場合ではかなり変化していることがわかる。

* F の推定値を $y = \ln F = ax^2 + bx + c$ とおき、これと実測値 F_i の対数 $y_i = \ln F_i$ との残差平方和 $S_{y/x} = \sum \{y_i - (ax^2 + bx + c)\}^2$ が最少になるよう $\frac{\partial S_{y/x}}{\partial a} = \frac{\partial S_{y/x}}{\partial b} = \frac{\partial S_{y/x}}{\partial c} = 0$ とおいて a, b, c を求めた。

Table 2 Dimensions of collimators and their combinations

Radiation source	Radiation detector	Test No.	Dimension of collimator*	
			Source side $d_1(\phi) \times l_1(l)$ mm	Detector side $d_2(\phi) \times l_2(l)$ mm
^{85}Kr	G-M tube	1	5×10	26×13
		2	20×10	$(26 \times 13) + \text{H. C.}^{**}$
		3	20×40	26×13
	Ionization chamber	4	20×40	26×13
^{204}Tl	G-M tube	5	27×20	27×30
		6	36×20	$(27 \times 8) + \text{H. C.}$
		7	27×20	27×20
	Ionization chamber	8	27×20	27×20

Specifications of radiation sources are as follows:

Source of ^{85}Kr ; ^{85}Kr gas is hermetically sealed within a metal container equipped with a thin metal foil window. The activities of source are 25 mc, and its active diameter is 17 mm.

Source of ^{204}Tl ; ^{204}Tl is deposited on aluminium foil disc with an active area of 40 mm in diameter, and its activities are 20 mc.

* For the signs of d_1, l_1, d_2 and l_2 , refer to Fig. 4.

** H. C. means a honey-comb type collimator, the path length along the radiation beam is 10 mm.

Fig. 4 The arrangement of the radiation source and detector around the conveying pipe 290 mm in inside diameter

考 察

1. コリメーションの効果

Fig. 5 において、G-M 管の場合コリメーター

Fig. 5 Upper figures show the relations between the concentration of coal and the output signals from detector. Note that the measuring conditions (dimensions of collimator or kind of detector) are differ from each other.

Lower figures show the mass absorption coefficients, which vary with the variations of the concentration.

Note: numbers in figures show the test No. (ref. table 2).

を深くかけるほど μ_m は大きくなる傾向を示している。なかでも (1) ^{85}Kr の場合は蜂の巣型コリメーターを装着したとき (No. 2) よりも、むしろ線源側を極端にコリメートした (No. 1) ほうが散乱線除去に対する効果は著しい。(2) ^{204}Tl の場合は検出器側に蜂の巣型コリメーターを装着したときに μ_m がいちばん大きい (No. 6)。

これらの結果から、散乱線の影響を少なくするためにはできるだけ線源形状の小さいものを使って、これにコリメーターを装着するほうがよいが、この実験で使った ^{204}Tl のように線源の有効面積が大きい場合には検出器側に蜂の巣型コリメーターを装着すると十分効果があると考えられる。

2. G-M 管と電離箱の比較

^{85}Kr , ^{204}Tl いずれの場合にも電離箱に対する μ_m は G-M 管のそれよりも大きい。そのおもなる理由としてつぎの2つが考えられる。(1) 電離箱と G-M 管の放射線検出機構の相違による。すなわち、電離箱では放射線源から真直ぐに入射して電離箱内部を十分に通過する場合と、散乱線のように斜め方向から入射して端のほうの空間をわずかにかすめて通過する場合には前者のほうが出力電流に寄与する率は大きい。G-M 管ではいずれの放射線に対しても大体入射粒子数だけのパルスが発生する。(2) 電離箱の分解能は考慮しなくてよいから、G-M 管のように計数損失がない。この影響を調べるため、G-M 管の実験データに計数損失補正 (不感時間 $200 \mu s$) を行なって比較したが μ_m は若干電離箱のそれに近づく程度で (1) の理由のほうがはるかに大きいようである。

3. 測定精度

この実験で得られたデータはいずれも短期間の観測にもとづくものであるから、計器の各種誤差はあまり含まれていない。したがって、実験結果のいくつかについて放射線の統計動揺に起因する濃度の相対誤差を求め、これを Fig. 6 に示す。なお、この濃度の相対誤差としては計器出力 F に伴う統計誤差 ΔF を標準偏差の2倍と見積って、

$$\Delta F = \sqrt{\frac{2iF}{\tau}} \quad (i: \text{粒子出力} \quad \tau: \text{計器時定数})$$

Fig. 6 The relation between the concentration of coal and the measuring error due to the static fluctuation of the radiation intensity

において, これを被測定量 x の相対誤差

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta F}{\partial F / \partial x} \cdot \frac{1}{x}$$

に換算したものである¹⁾。また, F としては実測から求めた回帰方程式を使用した。

Fig. 6 から, (1) G-M 管計測では一定強度の線源に対し放射線通路をコリメートするとたしかに μ_m は大きくなるが, 一方, 計数効率の低下により統計動揺が増え, 結果的には濃度誤差はあまりかわっていない。しかし, μ_m を大きくすることはほかの計器誤差にもとづく濃度誤差が小さくなるから, 長期測定のためにはやはりある程度コリメートするほうが有利であろう。(2) No. 3 と 4, No. 7 と 8 はそれぞれ G-M 管と電離箱とをほぼ同一条件(幾何学的配置, 計器の時定数)にして測定したのであるが, 放射線の統計誤差にもとづく濃度誤差は電離箱のほうがすぐれている。また, 長期測定に対しても電離箱ならば計器の比例型誤差を小さくすることも比較的容易であり, 寿命の点でも電離箱のほうが適していると結論できよう。

結 言

これまで微粉炭濃度の連続的計測に関しては決定的方法はなかったが, β 線透過法によりかなりの精度で測定できることがわかった。これを現場の運転管理に結びつけたり, あるいは, 粉体工学的研究にも適用し得るようになればその成果には期して待つべきものがある。また, Fig. 2 のように粉体の導管内の流動状況もかなり明瞭に検出でき, すでに現場のある水平管に取付けてある程度の成果を得ている。

しかし, この実験では, なお工業計器としての検討が不十分であり, まだ多くの問題点を残している。たとえば, 微粉炭と空気の相対速度の問題, 均一流れの確保, 空気密度の変化に対する対策など, さらに今後の実験で検討されなければならない。

文 献

- 1) 三輪博秀: 応用放射線計測 p. 194, 日刊工業(1956)

Measurements of Pulverized Coal Concentration in Pneumatic Conveyor Using Beta-emitting Isotopes

By

Hiroshi IMAMURA, Junro TSUJII and Makoto YOKOOJI

(Central Research Inst. Ube Industries, Ltd.)

(Received December 8, 1961)

The continuous measurement of the pulverized coal concentration in pneumatic conveying pipe is a very difficult matter. Should it be possible, it will contribute to the

development of coal combustion control.

The experimental results with a laboratory equipment has shown that the instantaneous concentration of pulverized coal can be

determined by measuring the intensity of beta-rays penetrating through the pulverized coal in flowing stream.

The equipment was designed to circulate the pulverized coal, and the concentration in a vertical straight pipe (290 mm in inside diameter) can be changed continuously over a definite range by controlling the feeding rate of the coal to the pipe. Six measuring points were composed of two windows faced each other on the pipe wall, and windows were sealed with nylon films of 0.2 mm in thickness. Nylon film was favorable to the window on account of less absorption for beta-rays and strong resistance for wear.

In the first, the flow state of the pulverized coal at each measuring point was observed by measuring the intensity of penetrated radiations under the constant feed rate of pulverized coal. Then, the concentration of the pulverized coal was varied

over the range 0.2~1.2 or 1.4 kg per cubic meter of air with air speed of 12~14 m/sec, and the corresponding intensity of penetrated radiations was observed at a measuring point in fairly stable flow.

Relative errors of the concentration caused by statistical fluctuation (estimated as twice of standard deviation) were calculated from the regressions of the radiation intensity upon the concentration.

In these experiments, ^{85}Kr (25 mc), ^{204}Tl (20 mc), halogen quenched G-M tube and ionization chamber were employed. The relative errors of the concentration at 1.0 kg/m³ were as follows:—

- (1) In using of ^{85}Kr ,
 - $\pm 2.8\%$ for ionization chamber,
 - $\pm 4.0\%$ for G-M tube.
 - (2) In using of ^{204}Tl ,
 - $\pm 3.2\%$ for ionization chamber,
 - $\pm 5.0\%$ for G-M tube.
-