放射性粒子のサンプリング用配管への 付着損失による濃度評価の問題

渡 辺 征 紀*

(1969年3月1日 受理)

Problems of Radioactive Aerosol Loss in Sampling Conduits

By Seiki WATANABE

A multichannel air monitoring system with centralized sampling method is required with development of atomic energy. This monitoring system is commonly sampled through conduits from sampling points.

The disadvantage with this monitoring system will be the aerosol loss due to deposition in the sampling conduits. This report is explained to the factors of aerosol loss in sampling conduits. Aerosol loss is caused by diffusion, impaction, gravity settling, electrical force and other mechanism.

It must be considered for design to minimize aerosol loss in sampling conduits.

はじめに

原子力開発の進展およびその規模の増大に伴い、核燃料の取り扱い、再処理施設の操業、原子炉事故の可能性などから、環境へ放出される放射性粒子の濃度を正しく評価することは保健物理的観点から今後一層重要となる。放射性粒子の評価方法として定置モニターおよびパーソナルモニターによる評価方法が実施されており、ここで使用されるサンプリング用配管の性能試験については多くの報告がなされている。(1,2,3,4,5)

ところで、これからのモニタリングの方式は自動化が進むにつれて、集中モニタリング方式による連続監視の必要性が重要になると考えられる。そこで付随的な問題として、サンプリング用配管への粒子の付着が問題となり、濃度評価に誤差を生じる原因となる。この配管への粒子の付着損失の要因について述べる。

1 管内空気の流れ

配管内の粒子の移動を知るには、管内の空気の流れについて知る必要がある。管内の気流が相対的に低流速の場合は層流 (laminar flow) 高流速の場合には乱流 (turbulent flow) となる。一般にレイノルド数 (以下 Re と記す) を基準にし、2100以上の場合乱流、2100以下の場合層流となる。管内気流の速度分布を [Fig-1] に示す。層流の速度分布は次式(6)で表わされ

$$u = u_0 \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 1 Flow pattern of flow line in conduit

又乱流の速度分布は次の近似式(6)で表わされる。

$$u = u_0 \left(\frac{R - r}{R} \right)^{1/7} \dots \dots \dots (2)$$

但し乱流の場合は各方向に分速度をもち、流れに直角方向の分速度は一般に平均速度($\bar{u}$)の3~10%に相当し、沈降速度(U_g)より大きい場合粒子はこの分速度で管内に浮遊する。

2 管内への粒子付着の要因

管内への粒子付着による損失の要因として、粒子の物理的性質から、拡散、沈降、粒子の帯電、管の材質その他気流の流れの機構に大別して考えることができる。

* 放射線医学総合研究所 (National Institute of Radiological Sciences)

2-1 拡散による損失

サブミクロン領域 (0.1μ 以下) の粒径になると拡散率の上昇に伴い拡散による損失が重要となる。Thomas⁽⁷⁾ は管内への層流中の拡散によるエアロゾルの損失について次式を与えている。

$$E_d = 1 - (0.819e^{-88.857\mu d} + 0.097e^{-22.3\mu d} + 0.032e^{-57\mu d} + 0.027e^{-127\mu d} + 0.025e^{-750\mu d}) \dots (3)$$

Fig. 2 Fractional diffusion loss E_d in conduits as a function of quantity $\mu s = \pi DL/Q$ where D is the diffusion constant length, and Q is the volumetric flow rate.

Fig. 3 Dependence of diffusion constant on particle size.

E_d : 拡散による損失の割合

$$\mu d : \pi DL/Q$$

D : エアロゾルの拡散定数

L : 管の長さ

Q : 容積流量率

そこで拡散損失 (E_d) と拡散定数 (D) 管の長さ (L) 流量率 (Q) の関数 (μd) との関係は [Fig-2] で与えられる。なお拡散定数 (D) と粒子径 (r) との関係を [Fig-3] に示す。

2-2 沈降による損失

粒子径が 1μ より大きくなると重力沈降による損失が無視できなくなる。粒子径と沈降速度との関係を [Fig-4] に示す。沈降による損失 (E_s) と沈降速度などの関係について次式⁽⁷⁾が求められている。

$$E_s = \frac{0.907LZd}{Q} \dots (4)$$

Z : エアロゾル沈降速度

d : 管の直径

又層流においてポリスチレンラテックス (1.305μ) を水平管 ($1.58\text{cm } d$) を通気し、流れのパターンについて求め、これを実験的に証明し、この沈降に対する応用方程式として、次式が求められている⁽⁸⁾。

Fig. 4 Dependence of settling velocity on particle size, unit density particles.

$$\frac{3 LZ}{4 V_{avd}} = (2\sqrt{1-x^2} + y)(\sqrt{1-x^2} - y)^2 \dots (5)$$

$$V_{av} = q/x \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

x, y : 流れ方向に対する管内水平垂直向の座標

2-3 粒子の帯電による損失

粒子が帯電している場合、電気的作用による損失が考えられる。そこで、粒子が帯電している場合および無帯電の場合について、管内への粒子の相対的損失について知る必要がある。帯電した粒子は、放射線により discharge する方法^(7,8)が試みられており、その効果が得られている。例えば、20mciの $Sr-90$ の線源上に $1,305\mu$ のポリスチレンラテックス粒子を通すことにより、Charge level は約 $1/10$ に減少する。Charge level の差による管内への損失の関係を [Fig-5] に示す。この図から、Charge level は管内への損失の効果は極めて少ないことが明らかである。

Fig. 5 Comparison of experimental data with theoretical gravity settling equation

2-4 配管材質の電気伝導度

サンプリング用配管の材質の物理的性質、特に電気伝導度により損失は影響を受ける。管が金属の導体であれば、これは一般に問題にならないが、ゴム管のような非伝導体であれば、その損失を考慮しなければならない。損失の効果について Thomas⁽⁷⁾は実験的に求めている。しかし、電気伝導性の金属管を使用しても、高く荷電したエアロゾルの場合には損失が考えられるが、放射性物

質の存在が discharge の効果として作用し、損失はほとんど無視できると考えてよいであろう。いずれにしてもサンプリング用管には金属の使用が望ましい。

2-5 管内空気の乱れによる損失

高い Re で粒子が管内を流れる時、各所に渦拡散(eddy diffusion) 渦衝突(eddy impingement)が発生し損失が無視できなくなる。さらに、バルブ、ベンドの形状によっては inertial impaction の作用でエアロゾル付着が認められる^(10,11)。単位時間に単位面積に付着する粒子数と、その面上の単位体積のガス中の粒子数の比を付着定数(K)とすると、 Re と K との関係について [Fig-6] が得られる⁽¹²⁾。

Fig. 6 Deposition of sulfide particles in $3/4$ welded stainless steel pipe

又エアロゾルの50%が管への付着により損失する管の長さを計算することは付着の程度を表わす一方法であることから、Schwendimen⁽¹²⁾らは次式を求めている。

$$L^{1/2} = \frac{0.693 V D}{4 K} \dots (6)$$

K : 付着定数

V : 気流の平均速度

D : 管の直径

なお、1インチのAl管を使用した場合の $L^{1/2}$ と Re の関係を [Fig-7] に示す⁽¹²⁾。このように、乱流による付着損失はかなり大きく認められている。特に粒子径と

サンプリング速度はかなり影響が大きい。いずれにしても、乱流をさけるべく、重力沈降が関係しない程度の低流速が使用することが望ましい。

Fig. 7 Duct half length particle deposition in one inch aluminum pipe

2—6 熱拡散による損失

管内外の温度差が著しく大きい場合、熱拡散による損失を一応考慮した方がよい。これは熱伝導率の高い金属管の使用で最小にすることができるが、一般に、管の内面と外面の温度差が少ない場合には問題とならない。

3 サンプリング管径と流量率の関係

管内の付着損失については上述の如く多くの要因を含んでおり、各要因を充分考慮し、損失を最小にすべきである。損失の最も大きい要因と考えられる乱流と管径について、円筒管使用で常温常圧について次式がえられる。(7)

$$Re = \frac{8Q}{d} \dots\dots\dots(7)$$

Reが1200以下で完全な層流⁽⁷⁾が考えられるので、Reを1200と置くことにより次式が管内を流れる最大流量率を与えることができる⁽⁷⁾。

$$Q = 150 d \dots\dots\dots(8)$$

4 サンプリング吸引孔の問題

4—1 サンプリング吸引孔面の吸引速度

空気中の浮遊粒子をサンプリングする場合排気系のダ

クト内および作業環境の雰囲気中の2つに大別できる。ダクト中の空気中濃度評価のための吸引孔の面速は、流体力学的に等速吸引となるよう吸引流量率と吸引孔の断面積を決めるべきである。次に作業環境空気中の浮遊粒子の濃度を評価する場合、何を空気中濃度と定義するかによって、吸引流量率(吸引孔の面速)を決定しなければならない。人体が鼻呼吸する場合吸入される粒子の粒度分布と空気中の粒子の粒度分布とは同じではない。ICRPの報告⁽¹⁴⁾によると、鼻口の断面積を $2 \times 0.75 \text{ cm}^2$ とし、吸入時の平均流速をF (l/min) とすると、鼻から吸入される粒子濃度(C)と空気中粒子濃度(C_0)の比は次式で与えられる。

$$\frac{C}{C_0} = 1 - 0.09U/F \dots\dots\dots(9)$$

U：粒子の最終沈降速度

100μ以下のStokesの法則に従う粒子群に対して(10)式は、次式となる。

$$\frac{C}{C_0} = 1 - 2.69 \times 10^{-4} D_A^2 / F \dots\dots\dots(10)$$

D_A ：粒子径(μ)

上記のC/ C_0 の比は粒子の粒径と吸引速度の函数である。そこで空気中濃度を評価する際には、吸入の問題を考慮し、吸引部の面速を決定する必要があると考えられる。

4—2 吸引部の形状について

吸引孔部分の形状によっては、底流速吸引によっても縮流より管内に乱流を発生させる要因となり、管内への付着損失の程度を上げる結果となる。この影響を少なくするため吸引孔の形状をベル型入口断面⁽¹³⁾(bell shaped inlet suction)を採用することが望ましいと考えられる。

5 おわりに

作業環境空気中および排気ダクト内空気中の浮遊放射性粒子を、集中モニタリング方式により集塵し評価する場合には、サンプリング用管への粒子付着による影響の要因を考慮しなければならない。この重要な要因について簡単に述べてきたが、結論として、サンプリング用管は可能な限り短かくし、乱流の原因となる bend や Valve および水平部分を少なくし、さらに材質として金属で作るべきであり、管径と吸引流量との関係については管径はできるだけ大きく、吸引流量は低いことが望まれ、少なくとも、最高流量率として、流量率は管径の150倍程度が望ましいと考えられる。いずれにしても、サンプリング用管内への粒子の付着損失がさけられない場合には、この損失因子を充分考慮した評価がなされるべきで

あろう。なお本文は、管内への付着に関した最近の論文を中心にその要点を述べたもので、何らかの参考になれば幸いである。

参 考 文 献

1. E. A. Ramskill and W. L. Anderson : The inertial mechanism in the mechanical filtration of aerosol, J. Colloid. Sci. 6. (1951)
2. J. J. Fitzgerald and C. G. Detwiler : Collection efficiency of air cleaning and air sampling Filter media in a particle size range of 0.005 to 0.1 micron, KAPL-1463, (1955)
3. S. Watanabe, T. Inouye : Evaluating method for airborne radon daughter, Radiological health and Safety in Mining and Milling of Nuclear Materials Vol. 1. IAEA. (1964)
4. 渡辺他 : 放射性エアロゾルに対する各種濾材の相対的捕集率に関する検討, 保険物理分科会 B-10 (1968)
5. E. Tanaka et al : A heigh-sensitive continuous plutonium air monitor, Health Physics. Pergamon Press Vol. 14 (1968)
6. 化学工学協会編 : 流動および流体の取扱い (化学工学便覧) 丸善
7. Jess W. Thomas : Particle loss in sampling conduits, Assessment of airborne radioactivity proceeding of Symposium 3—7 (1967)
8. Jess W. Thomas and Ronald H. Knuth, ; Patterns of aerosol Particles setting in stream line flow in a straight horizontal tube. Air & Water Pollution int. J. Pergamon Press. Vol. 10(1966)
9. 坂主勝弘 : β 線による粉体帯価の除去, 粉体工学 Vol. 3. No 12. (1966)
10. C. N. Davies : The rate of deposition of aerosol particles from turbulent flow through Ducts. Ann. Occup. Hyg. p. 239 (1965)
11. 渡辺 他 : NIRS-Pu-5 (1967)
12. L. C. Schwendiman and A. K. Postma : Turbulent deposition in sampling lines. TID-7627, 127 (1962)
13. Friedlander, S. K. and H. F. Johnstone : Deposition of suspended particles from turbulent gas Strlams. Ind. Eng. Chem. 49Pt. 2. p.1151