

JAERI-Research  
95-064



放射線効果によるエアロゾルの除去

1995年9月

西尾軍治・高田準一・成富満夫・村田幹生・阿部 仁・渡邊浩二

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)原子力資料サービス

## 放射線効果によるエアロゾルの除去

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

西尾 軍治・高田 準一・成富 満夫・村田 幹生

阿部 仁・渡邊 浩二

(1995年8月28日受理)

単極に帯電したエアロゾルは、その静電効果による影像力により、著しいフィルタ捕集効率の向上を期待できることはよく知られている。本実験は、ガンマ線の照射下で単極に帯電した DOP エアロゾルを製造すること、帯電エアロゾルと逆の極性を持つ放射線を遮蔽した金網電極上にエアロゾルを沈着させること、HEPA フィルタで帯電エアロゾルを捕集することを目標にして実施したものである。金網電極上に沈着した帯電エアロゾルの効率は、粒径が  $0.4\mu\text{m}$  以上になると  $DF=10^3$  を超えている。実験から、マイナスに帯電した DOP エアロゾルを HEPA フィルタに流すと、通常の HEPA フィルタの捕集効率に比較して、帯電エアロゾルの影像力効果により除去効率が約 100 ~ 1000 倍ほど向上することを見いだした。本除去法は、極めて高い効率でエアロゾルが除去できるので、半導体や電子機器およびバイオテクノロジー等のクリーンルーム、火力発電所や一般産業における排気ガス中の煤煙処理など幾つかの工業的規模の応用が期待できる。また、この除去法は、従来放射能が高いことに起因して燃焼処理が困難であった可燃性の中レベル廃棄物の焼却処理にも利用できると考えている。

Removal of Electric-charged Aerosols by Radiation Effect

Gunji NISHIO, Junichi TAKADA, Mitsuo NARITOMI  
Mikio MURATA, Hitoshi ABE and Kouji WATANABE

Department of Fuel Cycle Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 28, 1995)

It is well known that filtration efficiency of an aerosol is expected to be markedly improved for a charged aerosol of single polarity by an image force when the unipolar charged aerosol flows into fibrous filters. The experiments were carried out under the irradiation of gamma rays to generate the unipolar charged aerosol of DOP, to trap the charged aerosol on a wire gauge electrode of an opposite polarity shielded from the radiations, and to collect the charged aerosol by HEPA filter. The efficiency of charged aerosol above  $0.4 \mu\text{m}$  was trapped on the shielded electrode for  $DF \geq 10^3$ . It was also found that when the negative charged aerosol of DOP was passed through HEPA filter, the filtration efficiency was improved by the image force of the charged aerosol as about  $100 \sim 1,000$  times compared with that of inherent HEPA filter. This method which is capable of removing the aerosol with an extremely high efficiency finds many applications on an industrial scale, including clean-rooms used in semiconductor, electronic and biotechnological industries, the treatment of smoke in flue gases from thermal power plants and general engineering practices, the incineration of burnable radioactive medium-level wastes which have heretofore been difficult to incinerate.

Keywords: Aerosol, Radiation, Gamma Rays, Removal, Trapping, Ionization, Charge Unipolar, HEPA Filter, Gauge Electrodes, Image Force.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 本研究の原理と従来の研究 .....	2
2.1 エアロゾルの帯電現象 .....	2
2.2 HEPA フィルタによる無帯電エアロゾルの捕集 .....	2
2.3 従来の静電力を利用したエアロゾル帯電技術 .....	3
2.4 放射線を利用したエアロゾル除去法の原理 .....	4
3. エアロゾル実験と実験結果 .....	9
3.1 実験の概要 .....	9
3.2 実験装置 .....	9
3.3 実験方法と実験条件 .....	10
3.4 実験結果 .....	11
4. 理論的背景と計算結果 .....	29
4.1 微粒子の帯電効果 .....	29
4.2 無帯電粒子のフィルタ捕集理論 .....	30
4.3 帯電粒子のフィルタ捕集理論 .....	31
4.4 微粒子の帯電計算 .....	32
4.5 HEPA フィルタによるエアロゾルの捕集効率 .....	34
5. 考 察 .....	41
6. 結論と今後の展望 .....	43
文 献 .....	44
付 録 .....	45

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Principle of the Method and Usual Methods .....	2
2.1 Charging Phenomena of Aerosol .....	2
2.2 Filtration of Non-charged Aerosol .....	2
2.3 Usual Methods of Aerosol Removal by Electro-static Image Force .....	3
2.4 Principle of Aerosol Removal by Radiation Effect .....	4
3. Experiments and Results .....	9
3.1 Outline of Experiments .....	9
3.2 Experimental Apparatus .....	9
3.3 Experimental Methods and Conditions .....	10
3.4 Experimental Results .....	11
4. Theoretical Background and Calculated Results .....	29
4.1 Charging Effects of Fine Particles .....	29
4.2 Theory of Filtration for Non-charged Aerosol .....	30
4.3 Theory of Filtration for Charged Aerosol .....	31
4.4 Calculation of Charging for Fine Particles .....	32
4.5 Filtration Efficiency of Charged Aerosol by HEPA Filter .....	34
5. Discussion .....	41
6. Conclusion and a View of This Method .....	43
References .....	44
Appendix .....	45

## Captions of Figures and Tables

- Fig.2.1 Relation between electrical mobility and particle sizes for aerosols due to diffusion charging and field charging.
- Fig.2.2 Filtration efficiency of non-charged aerosol by fibrous filters.
- Fig.2.3 Field strength between cylindrical and wire electrodes in a corona discharging.
- Fig.2.4 Static charger of aerosol by  $\alpha$  -rays of  $^{241}\text{Am}$ .
- Fig.2.5 Principle of particle collection using photoelectrons emitted by UV irradiation.
- Fig.2.6 Principle of aerosol charging by gamma-ray irradiation.
- Fig.3.1 Flow-sheet of experimental apparatus.
- Fig.3.2  $^{60}\text{Co}$ -irradiation cell and its radiation field.
- Fig.3.3 Diffusion charging cell by gamma irradiation (TRAPOL).
- Fig.3.4 Relation between voltage and saturation electric current under the gamma-ray irradiation (electric plateau current).
- Fig.3.5 Distribution of aerosol concentrations vs. particle sizes at the outlet of TRAPOL ( $V=0$ ). White symbols are under  $\gamma$  -ray irradiation, and black without the irradiation (presence of aerosol coagulation).
- Fig.3.6 Distribution of aerosol concentrations vs. particle sizes before and after HEPA filter and its DF-values without  $\gamma$  -ray irradiation ( $V=0$ ).
- Fig.3.7 Concentration distributions of non-charged aerosol at the inlet of TRAPOL and positive-charged aerosol at the outlet vs. particle sizes.
- Fig.3.8 Concentration distributions of non-charged aerosol at the inlet of TRAPOL and negative-charged aerosol at the outlet vs. particle sizes .
- Fig.3.9 DF-values of positive- and negative-charged aerosols deposited in TRAPOL vs. particle sizes under  $\gamma$  -ray irradiation.
- Fig.3.10 Distribution of positive-charged aerosol concentrations vs. particle sizes before and after HEPA filter.
- Fig.3.11 Distribution of negative-charged aerosol concentrations vs. particle sizes before and after HEPA filter.
- Fig.3.12 DF-values of HEPA filter for positive- and negative-charged aerosols by the imaged force vs. particle sizes under  $\gamma$  -ray irradiation.
- Fig.3.13 Overall DF-values of HEPA filter for charged aerosols by TRAPOL vs. particle sizes under  $\gamma$  -ray irradiation.
- Fig.4.1 Number of electric charges on the aerosol vs. particle sizes due to diffusion charging and field charging.
- Fig.4.2 Calculated DF-values of HEPA filter for charged aerosol vs. particle sizes.
- Table 3.1 Data of HEPA filter using the experiment.
- Table 3.2 Experimental conditions (See Fig.3.1).
- Table 3.3 Kinds of experiments and a matrix of experimental conditions.
- Table 4.1 Kinds of electro-static forces and non-dimensional parameters to act fibrous filters.
- Table 4.2 Data of the calculations.
- Table 4.3 Number of electric charges on aerosol.
- Table 4.4 Data of HEPA filter using the calculation.
- Table 4.5 Decontamination factor of HEPA filter by Kirsch.
- Table 4.6 Decontamination factor of HEPA filter due to the electro-static imaged force of charged aerosol.

## 1. はじめに

この報告書は、「放射線によるエアロゾルの電離効果に関する研究」として平成元年度に原研の特別基礎研究に応募し、平成5年度まで実施した研究の成果である。この報告書の内容は、放射線によるエアロゾル粒子の帯電効果に関する基礎的な実験と理論計算に留まっているが、放射線を利用した本方式はエアロゾルを高い効率で大規模処理できる利点を備えているので、広い範囲の波及効果が期待できる。即ち、原子力分野では可燃性の放射性廃棄物の焼却炉などの煤煙除去に、エネルギー分野では火力発電所の排煙処理に応用できると考えている。また、半導体など電子工学産業（超LSIなど）やバイオテクノロジー産業（P4など）の先端分野におけるクリーンルームの超高性能エアロゾル捕集技術への応用も期待できる。

本方式によるエアロゾルの除去法は、雰囲気中に放射線を照射してガスを正と負のイオンに電離させ、この電離イオン対を正と負のイオンに分離して、どちらか一方の単極イオンをエアロゾルに作用させる。この単極イオンをエアロゾル粒子と衝突させると、単極に帯電したエアロゾルが生成する。この単極化した帯電エアロゾルは、帯電粒子の影像力（静電気）の作用により物体の表面に沈着や捕捉され易い性質を持っている。帯電粒子の影像力とは、帯電したエアロゾル粒子が無帯電の物質に近づくと、その物質の表面を逆の極性に分極して帯電粒子を物質の表面に捕捉する力である。また、帯電エアロゾル粒子と逆の極性を持つ電極に捕捉させるか、HEPAフィルタに捕集させることにより、さらに高い効率でエアロゾルが除去できる。

帯電したエアロゾル粒子は、エアロゾルの沈着や捕集の観点から優れた性質をもっている。即ち、コロナ放電法などで雰囲気ガスを電離させ、電離ガスを正と負のイオンに分離してエアロゾルに作用させれば単極に帯電したエアロゾルが発生することはよく知られている<sup>(1)</sup>。しかしながら、コロナ放電法を利用して単極化エアロゾルを発生させる方法は、放電領域を大きく取ることが困難であるので、エアロゾルの大量処理には不向きであり、未だ工業化されていない。また、サブミクロン領域のエアロゾルを高性能粒子エアフィルタ（HEPA Filter）で捕集した場合、 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ の領域にある微粒子に対するフィルタの捕集効率が最小となることが知られている<sup>(1)</sup>。そこで、ガンマ線や電子線を利用して大量のエアロゾルを単極に帯電させることができるならば、従来捕集が困難であったサブミクロン領域のエアロゾル粒子を高い効率で捕集することができると考えた。即ち、放射線効果により荷電したエアロゾルを静電中和させることなく、単極化して取り出せば、帯電エアロゾルのフィルタに対する影像力によってサブミクロン領域のエアロゾル粒子が高い効率で捕集できると期待した。この報告書では、放射線効果による帯電エアロゾルの除去法の原理、実験の内容と結果、理論的背景と計算結果について纏めた。



## 2. 本研究の原理と従来の研究

### 2. 1 エアロゾルの帯電現象

エアロゾル粒子の帯電機構には、静電気荷電効果 (Static electrification)、拡散荷電効果 (Diffusion charging)、及び電界荷電効果 (Field charging) がある。静電気荷電効果とは、誘電率の高い液体や乾燥した物質の表面から微粒子を分割した場合に電子の授受が生じ、微粒子の内部に電子の過不足が起こり、微粒子が帯電する現象である。拡散荷電効果とは、コロナ放電 (Corona discharge) などにより雰囲気ガスを単極イオン (Unipolar ion) に変換すると、単極イオンと微粒子間のブラウン運動による衝突でエアロゾルが帯電する現象である。電界荷電効果とは、強い電場により正負イオン対が電気力線に沿って逆符号の電極に向かって泳動し、このイオン対と微粒子が衝突して帯電する現象である。図 2. 1 は、エアロゾル粒子の拡散荷電と電界荷電について、粒子の電気泳動度と粒径の関係を示したものである<sup>(1)</sup>。図中の曲線から、エアロゾル粒子の電気泳動度は拡散荷電効果では微小粒子側 ( $< 0.1 \mu\text{m}$ ) に、電界荷電効果は大粒子側 ( $> 1.0 \mu\text{m}$ ) に大きな影響を与えることが分かる。

単極化した帯電エアロゾルが逆符号に帯電した物質に近づくと、クーロン力 (Coulomb force) による強い力で物質の表面に捕捉される。帯電したエアロゾルが無帯電の物質に近づいた場合、或いは無帯電のエアロゾルが帯電した物質に近づいた場合にも、エアロゾル粒子は物質の表面に捕捉される。前者の捕捉力を映像力 (Image force)、後者を誘起力 (Induced force) と呼ぶ。

### 2. 2 HEPA フィルタによる無帯電エアロゾルの捕集

HEPA フィルタによる無帯電エアロゾルの捕集機構は、フィルタ繊維に対する微粒子の拡散さえぎり効果と慣性さえぎり効果で支配されている<sup>(2)</sup>。さえぎり効果とは、フィルタの繊維近傍の流れ場にある微粒子が繊維方向の流線に沿って移動し、微粒子が繊維と衝突して捕捉される現象である。エアロゾルの粒子径が小さい場合には、微粒子は流線の回りをブラウン運動により拡散し、繊維と衝突する確率が大きくなる。この現象を拡散さえぎり効果と呼ぶ。一方、粒子径が大きい場合には、慣性力による粒子の移動によって粒子が流線の軌跡に追従できず、流線を横切って繊維に衝突する場合がある。この現象を慣性さえぎり効果と呼ぶ。捕集効率が低下する  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$  の領域にあるサブミクロン粒子は、拡散さえぎり効果と慣性さえぎり効果の狭間にあり、この領域にあるエアロゾルはフィルタ繊維に対する捕集効率が著しく低下する。図 2. 2 は、単一のフィルタ繊維径を変化させた場合のエアロゾルの捕集効率を粒径に対して計算したものである<sup>(1)</sup>。図の結果から、エアロゾルの粒径が小さくなると拡散さえぎり効果が、大きくなると慣性さえぎり効果が支配的になり、微粒子側と大粒子側の捕集効率は上昇する。フィルタ繊維の直径が HEPA フィルタの繊維径 (約  $0.5 \mu\text{m}$ ) に近くなると、両者のさえぎり効果の狭間にあたる  $0.09 \sim 0.1 \mu\text{m}$  の捕集効率が急激に低下していることが分かる。

## 2. 3 従来の静電力を利用したエアロゾル帯電技術

### (1) コロナ放電法によるエアロゾルの帯電法

一般に、帯電エアロゾルはコロナ放電でつくられる。コロナ放電では、円筒状の電極と同心状の線電極の間に強い直流電場をかけて線電極の回りに狭い領域の放電を起し、雰囲気ガスを電離させる。線電極に負の電位を与えた場合には、放電した正イオンは線電極に、負イオン（電子）は円筒電極に向かって運動する。電場の強さは線電極からの距離で急減するので、電子が線電極から円筒電極の方向に移動するにつれて運動の速度が減少し、雰囲気ガスとブラウン運動により衝突して負イオンを形成する。図 2. 3 にコロナ放電発生器の線電極と円筒電極との間に生ずる電場の強さを線電極からの距離に対して示した<sup>(1)</sup>。図に示した通り、コロナ放電は線電極の回りに限定されており、その放電領域は両電極間の空間に比較して極めて小さい。従って、両電極間にエアロゾル粒子を導くと、粒子は拡散荷電効果により帯電することになる。コロナ放電法は放電の領域が小さいこと、強い電場が必要であることから帯電装置の大型化が困難であり、本質的にエアロゾルの大量処理の観点からは不適である。

### (2) アルファ線によるエアロゾルの帯電法

アルファ線（ $\alpha$ 線）を利用して、エアロゾル粒子を単極化してフィルタで捕集する研究が報告されている<sup>(3)</sup>。図 2. 4 に $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 線により帯電エアロゾルを製造する単極化セルを示す。この方法は、高さ10cm程度の小型容器の底部と上部に電極を配置し、両電極間に弱い直流電場をかける。容器底部の電極上には、 $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 線源が取り付けられている。 $\alpha$ 線で電離した正負イオン対は、電極の極性によりどちらか一方の単極イオンが $\alpha$ 線の飛程（約4cm）外に電気泳動して移動し、容器の上部を流れるエアロゾルと混合して粒子を単極に帯電させる。この研究では、単極化した帯電エアロゾルをフィルタに流し、フィルタの捕集効率を実験的に決定した<sup>(4)</sup>。また、フィルタに対する帯電粒子の影像力に関する解析も報告している<sup>(5)</sup>。 $\alpha$ 線によるエアロゾルの単極化法は、微粒子を拡散荷電効果によって帯電させるので、サブミクロン粒子の帯電法としては優れている。しかし、 $\alpha$ 線の飛程は小さいので、電離イオンの生成領域やエアロゾルの帯電領域は小さく、帯電装置の大型化は難しい。

### (3) 紫外線の光電効果を利用したエアロゾルの帯電法

エアロゾルを単極に帯電させる方式として、紫外線を光電子放出材に照射して光電効果により電子線を放出させ、この電子線をエアロゾルに作用させて帯電エアロゾル粒子をつくる研究が報告されている<sup>(6)</sup>。図 2. 5 に紫外線光電子法によるエアロゾルの単極化セルを示す。この方法は、エアロゾルを内蔵するセルの石英ガラス窓に紫外線を透過し、セルの内部に設置した光電子放出板（Auの超薄膜）に照射して光電子を発生させる。この光電子は、セル内の微粒子を拡散荷電効果により帯電させる。光電子放出板と石英ガラス窓の極く近傍の壁には電極が設置されており、帯電エ

エアロゾルの電界泳動により粒子を電極上に捕集する。この方法の利点は、放射線を用いずに比較的大きな空間中のガスを電離することができることにある。しかし、紫外線を光電子放出材に照射した場合の効率の低さから、高濃度のエアロゾルを大量に処理することは難しいと考えられる。

#### (4) 帯電フィルタによるエアロゾルの捕集

サブミクロン粒子をフィルタで効率よく捕集するには、フィルタ濾材の繊維径を細くするとよい(図2.2参照)。しかし、フィルタの繊維径を極端に細くするとフィルタ濾材の圧力損失が大きくなり、エアロゾルの処理能力が低下して実用に供しない。そのため、単極に帯電させたフィルタ繊維に無帯電のエアロゾルを通過させ、無帯電粒子に対するフィルタの誘起力を利用して捕集する帯電フィルタが商品化されている<sup>(2)</sup>。帯電フィルタの濾材繊維径は太いので、繊維の拡散さえぎり効果は期待できない。また、帯電フィルタに多量のエアロゾルが堆積すると帯電フィルタの電荷が中和され、エアロゾルの捕集効率が著しく低下することが問題になっている。

### 2. 4 放射線を利用したエアロゾル除去法の原理

図2.6にガンマ線( $\gamma$ 線)或いは電子線( $\beta$ 線)を利用したエアロゾルの除去原理を示す。この方法は、放射線の照射下にある電極と放射線を鉛で遮蔽した電極の間に直流電圧をかけ、照射された電極から遮蔽された電極の方向にエアロゾルを流す。両電極を流れる電流は、放射線により電離したガスのイオン数に比例した飽和電流である。従って、電流の大きさは放射線の強さやセルの構造で変化する。電離した正と負のイオンは拡散荷電効果によりエアロゾルを帯電させる。放射線は帯電したエアロゾルを静電中和する性質を持っているので、この中和作用を避けるためには、一方の電極の放射線遮蔽が必要になる。セル内で帯電した正と負のエアロゾルは流れと共に鉛材で遮蔽された電極を通過する。このような工夫を施すと、遮蔽された電極の極性が $\ominus$ であれば $\oplus$ のエアロゾル粒子が、電極の極性が $\oplus$ であれば $\ominus$ のエアロゾル粒子が電極上に捕集される。無帯電のエアロゾルは遮蔽された電極に捕集されることなく通過するが、電極を通過した雰囲気ガス中には電極の極性と同じ電荷を持つイオンが大量に存在するので、無帯電エアロゾルは単極に帯電することになる。従って、この電極を数段重ねれば、エアロゾルを高い効率で除去することが可能である。この方法は、電極上にエアロゾルが堆積しても差圧の上昇が起こらない利点を持ち、また $\gamma$ 線や $\beta$ 線は帯電領域を大きく取ることができるので、エアロゾルを大量に帯電させて除去することが可能である。ここでは、この放射線による帯電法をTRAPOL(Trapping by poles)と呼ぶ。また、TRAPOLを通過した帯電エアロゾルをHEPAフィルタで処理すると、フィルタ濾材に対する帯電粒子の影像力により、通常のHEPAフィルタでは捕集が困難であるサブミクロン領域のエアロゾル粒子を効果的に除去できる特徴を備えている。

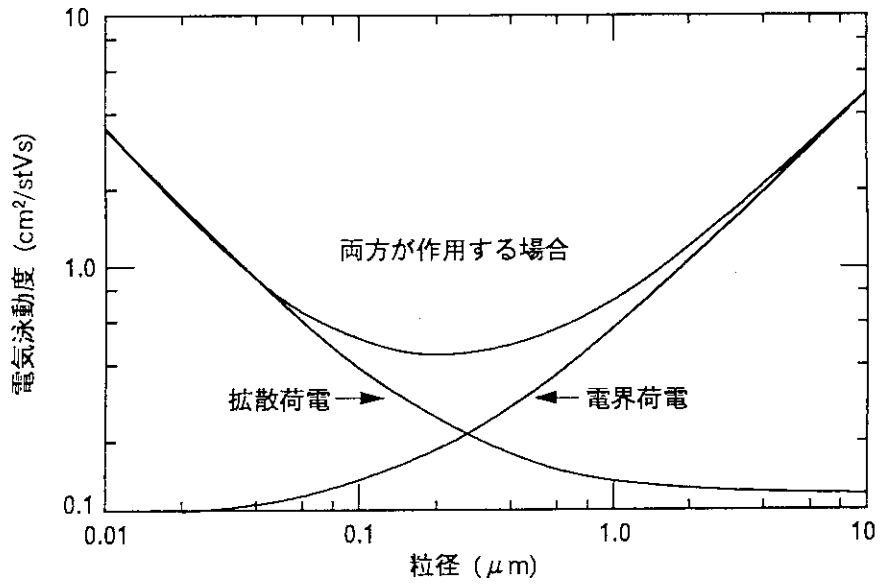


図 2.1 エアロゾル粒子に対する拡散荷電と電界荷電に関わる電気泳動度と粒径の関係 (帯電機構)  $E=5 \text{ kV/cm}$ ,  $Nt=10^7 \text{ s/cm}^2$

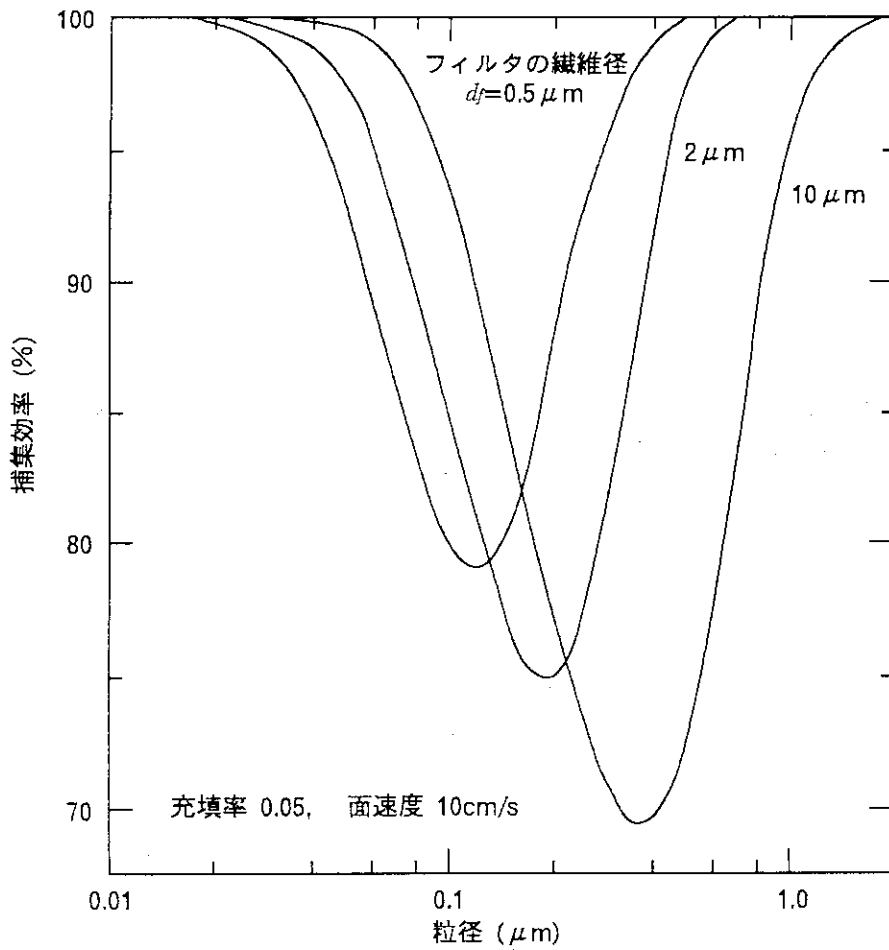


図 2.2 単一フィルタ繊維によるエアロゾルの捕集効率 (計算値)

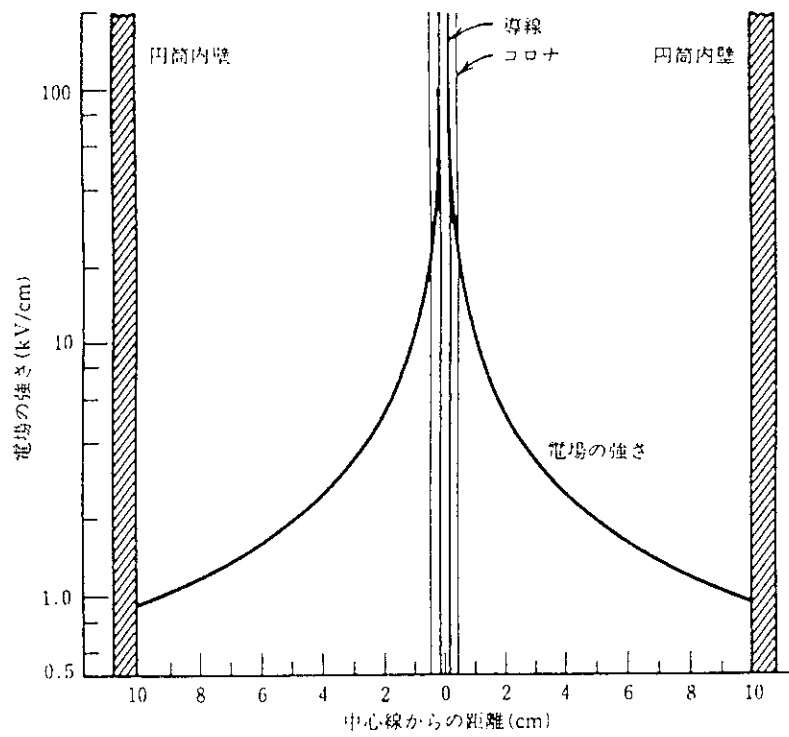


図 2.3 コロナ放電において円筒電極と線電極の間に生じる電場の強さ  
(円筒内径 : 20 cm, 線電極の直径 : 1 mm)

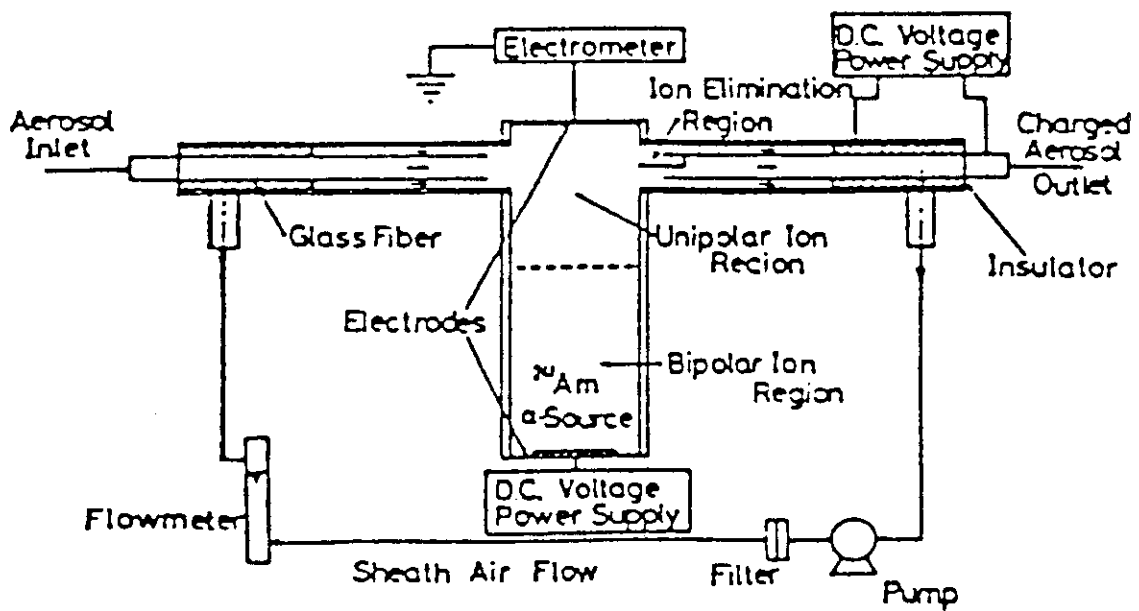


図 2.4  $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  線によるエアロゾルの単極拡散荷電セル

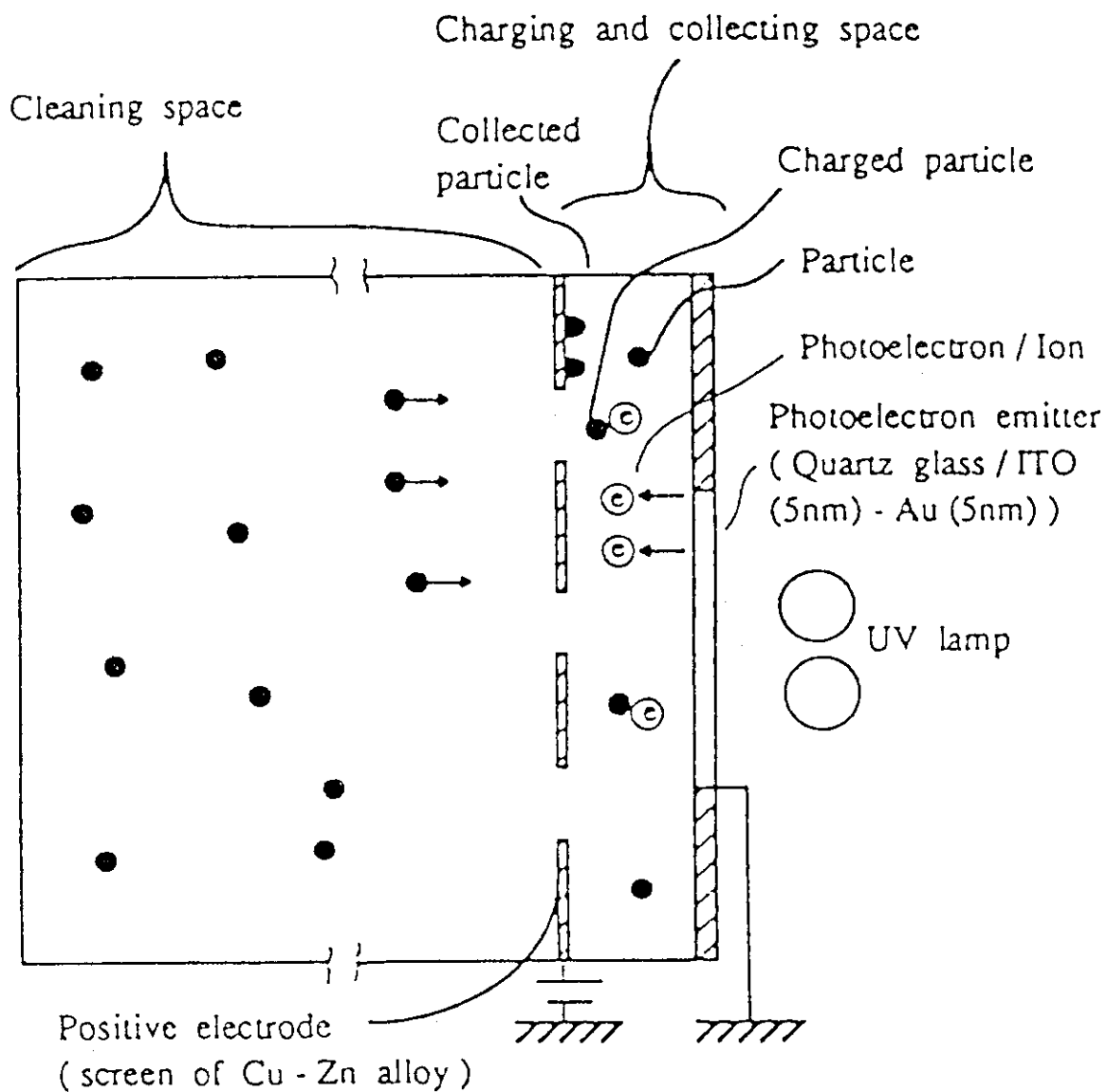


図 2.5 紫外線照射の光電子法によるエアロゾルの単極拡散荷電セル

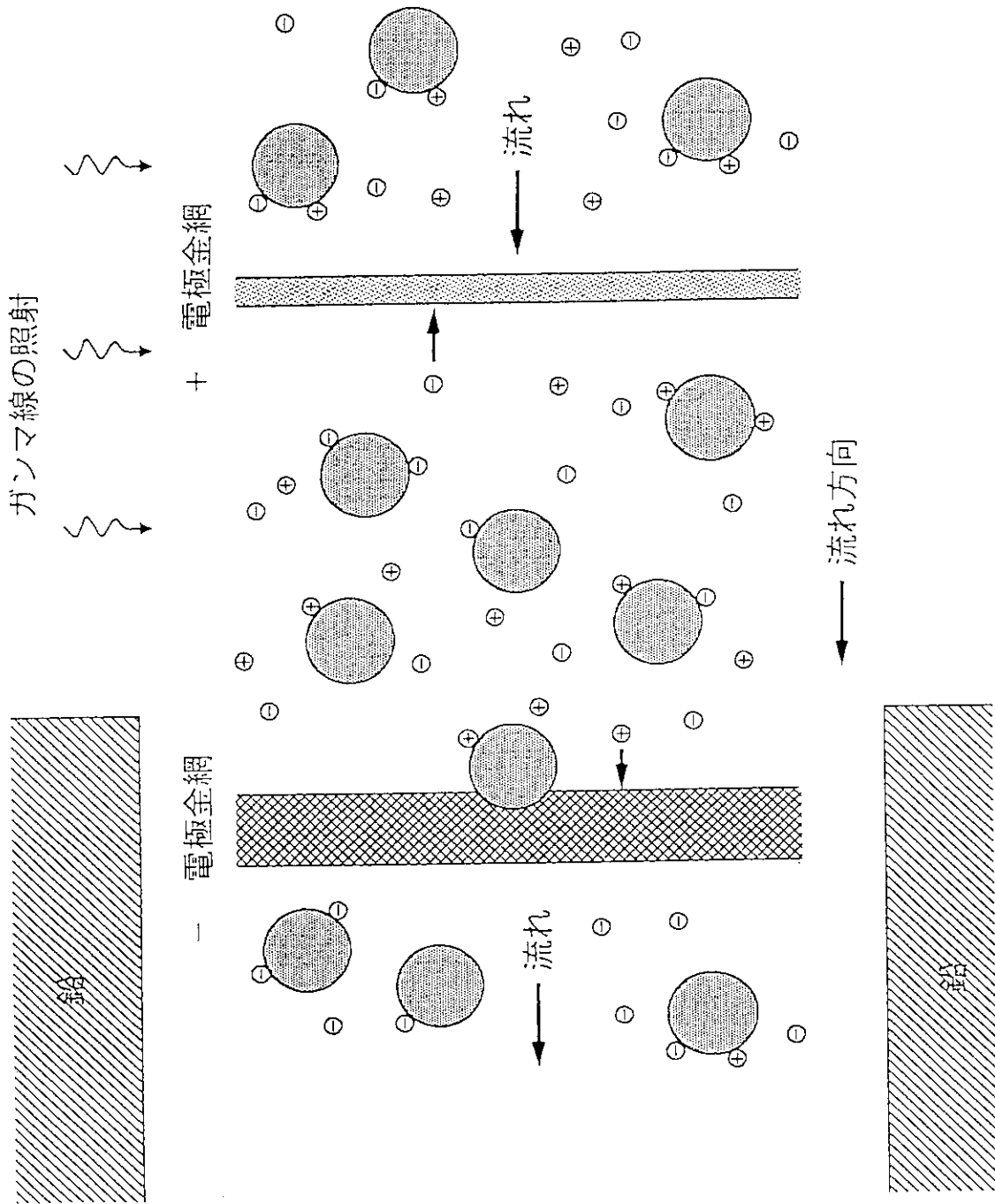


図 2.6 ガンマ線照射下のエアロゾルの荷電効果

### 3. エアロゾル実験と実験結果

#### 3. 1 実験の概要

エアロゾル実験は、TRAPOLに電位をかけない状態で、 $\gamma$ 線を照射した場合と照射しない場合について実施し、TRAPOLの出口位置におけるエアロゾルの粒子数濃度を粒径毎に測定した。この実験は、放射線によるエアロゾル粒子の凝集効果、電極上のエアロゾル粒子の沈着効果、及びHEPAフィルタの捕集効果を調べるために実施したものである。実験の結果、 $\ominus$ に帯電させたエアロゾルは、TRAPOLの電極上で大きな沈着を引き起こした。この沈着率は、 $0.4\mu\text{m}$ の粒子を通常のHEPAフィルタで捕捉する捕集効率とほぼ同じである。しかしながら、 $\oplus$ に帯電させたエアロゾル粒子は電極上の沈着率は小さいことが分かった。従って、実験で使用したDOPエアロゾル(Dioctyl phthalate)は、 $\ominus$ に荷電し易い性質を持っていると考えられる。実験により、 $\ominus$ に帯電した微粒子は、フィルタ濾材に対する帯電粒子の影像力により捕集効率が大幅に向上することが分かった。放射線の照射によるエアロゾルの帯電法は、エアロゾルの大量処理が可能であるので、工業的規模のエアロゾル除去が期待できる。

#### 3. 2 実験装置

##### (1) フローシート

図3. 1に実験装置のフローシートを示す。実験では、定量式シリンジポンプ(HAVARD model975)にてアトマイザー型のエアロゾル発生器(KANOMAX model3076)にDOPを供給し、ArガスによりDOPを噴霧した。噴霧したDOPエアロゾル粒子のうち、大粒子はトラップして、 $1\mu\text{m}$ 以下のサブミクロン領域にあるエアロゾルを発生させた。発生させたエアロゾルは帯電している可能性があるので、 $74\text{MBq}(2\text{mCi})$ の $^{85}\text{Kr}$ エアロゾル中和器(KANOMAX model3012)に通してエアロゾルの電荷を中和し、 $^{60}\text{Co}$ 照射装置(カナダ原子力公社 Gammacell1220)内に設置したTRAPOLに導入した。図3. 2に $^{60}\text{Co}$ 照射装置の鳥瞰図を示す。エアロゾル実験時における $^{60}\text{Co}$ 照射装置の放射能は約 $240\text{TBq}$ (約 $6500\text{Ci}$ )、線量率は約 $4.3 \times 10^{-2}\text{C/kg}\cdot\text{s}$ (約 $6 \times 10^5\text{R/h}$ )である。

##### (2) TRAPOLの構造

図3. 3にTRAPOLの構造を示した。TRAPOLは $216\text{cm}^3$ の容積を持つガラス製容器( $15\text{cm} \times 4\text{cm} \phi$ )で、その内部には円筒状の金網電極と棒状の金網電極が設置されている。円筒状の電極を含む空間は $\gamma$ 線により照射されているが、棒状金網電極の回りは鉛により遮蔽されている。この鉛の遮蔽は、棒状電極を通過する帯電エアロゾルを放射線による中和作用から守るため設置したものである。TRAPOLの電極には直流電圧がかけられており、放射線の強さで決まる一定の飽和電流が流れている(図3. 4参照)。



### (3) エアロゾル粒子の帯電

エアロゾル粒子は、照射された円筒状金網電極の空間に入り、鉛で遮蔽された棒状金網電極の方向に流れる。両電極を流れる電流は、放射線で電離されたイオン対の数に比例したプラトー電流である。この電流は、強い電場で流れる電界電流とは本質的に異なることに注意されたい。エアロゾルは、放射線により電離した正負のイオンとブラウン運動により衝突して正と負の帯電エアロゾルになる（拡散荷電効果）。正と負に帯電したエアロゾルは、流れと共に遮蔽された棒状金網電極を通過する。この時、棒状金網電極の極性が $\ominus$ であれば $\oplus$ 粒子が、棒状電極の極性が $\oplus$ であれば $\ominus$ 粒子が電極上に沈着する。無帯電エアロゾルや放射線で静電中和されたエアロゾルは棒状金網電極に捕捉されること無く電極を通過するが、電極を通過した後の雰囲気ガス中には棒状金網電極の極性と同一単極イオンが存在するので、エアロゾルは単極イオンと衝突して $\oplus$ 或いは $\ominus$ に帯電することになる。

### (4) 捕集効率の測定

図3. 1のフローシートに示したように、TRAPOLを通過した帯電エアロゾルは、ミキサー(MX-1)において大量の空気により希釈されてHEPAフィルタに入る。表3. 1に実験に用いたHEPAフィルタの諸元を示した。HEPAフィルタの前後には、サブミクロン領域( $0.065\sim 1.0\mu\text{m}$ )のエアロゾルが測定できるレーザー式光散乱エアロゾルモニター(pms社のHSLAS)が設置されている。HEPAフィルタの上流側のエアロゾル濃度(粒子数濃度)は高いので、エアロゾルを更に空気希釈(MX-2)してエアロゾルモニターに導入する。エアロゾルモニターでは、He-Neレーザーによる微粒子の光散乱強度をシリコンフォトダイオードで感知し、 $0.065\sim 1.0\mu\text{m}$ の領域にあるエアロゾルを32チャンネル(分解能: $0.005\mu\text{m}$ )に分割して、それらの粒子数濃度を測定する。実験では、HEPAフィルタ前後のエアロゾルの粒子数濃度を測定し、その濃度比からエアロゾルの各粒径についてHEPAフィルタの除染係数(DF値: HEPAフィルタの下流側濃度に対する上流側濃度の比)を求めた。

## 3. 3 実験方法と実験条件

実験では、定量式シリンジポンプからDOPを $0.11\text{cm}^3/\text{min}$ の流量でエアロゾル発生器に供給し、高純度アルゴンにて $3.5\text{ l}/\text{min}$ の流量でDOPを噴霧した。噴霧した大粒子エアロゾルはトラップされ、噴霧により帯電したエアロゾルの電荷は $^{85}\text{Kr}$ の $\beta$ 線で中和させた。中和されたエアロゾルは、 $^{60}\text{Co}$ 照射装置内に設置されたTRAPOLに導入した。表3. 2に実験条件を示した。表中の値から、TRAPOL内のエアロゾルの滞留時間は3.7秒である。TRAPOLの電極には1000Vの直流電圧がかけられている。電流は、 $\gamma$ 線の強さで決まる飽和電流( $i=5\sim 8\mu\text{A}$ )である。TRAPOLを通過した帯電エアロゾルは、ミキサー(MX-1)で空気により127倍に希釈されてHEPAフィルタに入る。実験では、エアロゾルの粒子数濃度を精度よく測定するためにHEPAフィルタの上流側のエアロゾルを更に52倍に希釈した。エアロゾルモニターでは、 $0.065\sim 1.0\mu\text{m}$ 領域の

粒子数濃度を連続的に計測している。表3. 3に実験番号と実験条件のマトリックスを示した。実験番号のうち、A-1~A-3及びB-1~B-2は無帯電エアロゾルについて、実験番号C-1A~C-2Bは⊕の帯電エアロゾルについて、実験番号E-1A~E-2Aは⊖の帯電エアロゾルについて、HEPAフィルタの捕集性能を調べるために実施した実験である。実験番号D-1A~D-2AとF-1A~F-2Bは、放射線照射によるエアロゾルの凝集効果の有無を調べた実験である。

### 3. 4 実験結果

#### (1) エアロゾルの粒度分布と凝集効果

図3. 5は、TRAPOLに $\gamma$ 線を照射した場合（白印）と照射しない場合（黒印）について、TRAPOLの出口位置(MX-1)、即ち、HEPAフィルタの上流側で測定したDOPエアロゾルの粒子数分布を示したものである。この実験では、TRAPOLの電極には電圧はかけられていない。図中の実験番号は、表3. 3に示した実験条件に一致している。図中、白印で表した実験は $\gamma$ 線を照射した場合、黒印は照射しない場合のエアロゾルの粒度分布（粒子数濃度）である。図中に示した粒度分布のうち、微粒子方向の分布にはDOPエアロゾルの噴霧時に発生するサテライトと呼ばれる微粒子が現れているが、実験では概ねサブミクロン領域のエアロゾルが発生したことが分かる。図の結果から、 $\gamma$ 線を照射した場合（白印）と照射しない場合（黒印）のエアロゾルの粒度分布は変わらず、放射線照射によるエアロゾル粒子の凝集効果は小さいことが分かる。

#### (2) 無帯電エアロゾルのフィルタ捕集効率

図3. 6は、TRAPOLに $\gamma$ 線を照射せず、電場もかけない状態でHEPAフィルタの上流側（黒印）と下流側（白印）の無帯電エアロゾル（DOP）の粒子数濃度を粒径に対して測定した結果である。図中、フィルタ上流側のエアロゾル粒子濃度はフィルタ手前に設置した希釈容器の希釈率で濃度が補正されている。図中の $\Delta$ 印は、HEPAフィルタに対する無帯電エアロゾルのDF値である。図の結果から、 $\Delta$ 印で表したエアロゾルのDF値は粒径に関して2次曲線になっており、最小値（鞍部）におけるDF値は $\sim 3 \times 10^3$ であることが分かる。このDF値は、通常のHEPAフィルタに対するDOPエアロゾルのDF値とよく一致している<sup>(7)</sup>。

#### (3) TRAPOL内の帯電粒子沈着

##### (a) 棒状電極に⊕電位を与えた場合

図3. 7は、TRAPOLの棒状金網電極に⊕の電位を与え、 $\gamma$ 線照射した場合（白印）について、HEPAフィルタの上流のDOPエアロゾルの粒子数濃度と粒径の関係をプロットしたものである。図中には、 $\gamma$ 線を照射せず、電場もかけない場合（黒印）のエアロゾルの粒度分布も示されている。 $\gamma$ 線を照射した実験（白印）では、棒状金網電極に1000Vの⊕電位をかけている。棒状電極に⊕の電位を与えた場合には、TRAPOLから流出するエアロゾルはプラスに帯電する。黒印と白印で表したエアロゾル粒子数濃度の差は、TRAPOL内で沈着したエアロゾル量を表す指標になる。

### (b) 棒状電極に $\ominus$ 電位を与えた場合

図3. 8に棒状金網電極に1000vの $\ominus$ 電位をかけた場合に測定したエアロゾルの粒度分布を示した。図中の黒印は、 $\gamma$ 線照射や電場が無い場合、白印は $\gamma$ 線照射と電場をかけた場合のエアロゾルの粒度分布である。 $\gamma$ 線照射下で、棒状電極に $\ominus$ の電位をかけた場合には、TRAPOLから流出するエアロゾルはマイナスに帯電する。帯電エアロゾルの沈着は、エアロゾルの粒径が大きくなるほど大きくなっている。この沈着は、TRAPOL内の金網電極で起こったと考えている。

### (4) 金網電極上のエアロゾルの沈着

図3. 9は、図3. 7と図3. 8から求めたTRAPOL内のエアロゾル沈着のDF値を粒径に対してプロットしたものである。図の結果から、棒状金網電極に $\ominus$ の電位をかけた場合、即ちTRAPOLから $\ominus$ 粒子が流出した場合(●)には、エアロゾル沈着のDF値は大きく、棒状電極に $\oplus$ の電位をかけて $\oplus$ 粒子を流出させた場合(▲)には、エアロゾル沈着のDF値は小さくなっている。また、 $\ominus$ の電位をかけた場合には、エアロゾルの粒径が大きくなるにつれてDF値が急激に増大し、粒径が $0.4\mu\text{m}$ 以上になると $DF=10^3$ を超えている。しかし、棒状金網電極に $\oplus$ の電位をかけた場合には、エアロゾル沈着のDF値は $\ominus$ の場合ほど急速な増大はしない。

### (5) HEPAフィルタによる帯電エアロゾルの捕集

#### (a) プラス粒子の捕集

単極に帯電したエアロゾルは、帯電粒子の影像力によりフィルタのDF値が向上する。図3. 10は、TRAPOLの棒状金網電極に $\oplus$ の電位を与え、 $\oplus$ のエアロゾルを流出させた場合のHEPAフィルタ前後の粒子数濃度を粒径に対して示したものである。図中の黒印はフィルタの上流側、白印はフィルタ下流側の粒子数濃度である。棒状金網電極に $\oplus$ 電位を与えた場合には、エアロゾルのDF値は期待したほど大きくない。

#### (b) マイナス粒子の捕集

図3. 11に棒状金網電極に $\ominus$ 電位を与えた場合のHEPAフィルタ前後の粒子数濃度と粒径の関係を示した。図中の黒印はフィルタの上流側、白印はフィルタ下流側の粒子数濃度である。電極に $\ominus$ の電位を与えた場合には、期待した通りの大きなフィルタのDF値が得られた。

### (6) 帯電粒子に対するフィルタ捕集のDF値

図3. 12は、棒状金網電極に $\oplus$ と $\ominus$ の電位を与えた場合、即ち図3. 10と図3. 11に示したHEPAフィルタによる帯電エアロゾルのDF値を示したものである。図中の●印は $\oplus$ 電位を与えた場合、▲印は $\ominus$ 電位を与えた場合のDF値である。図中には、 $\gamma$ 線を照射せず、電場の影響も無い場合の無帯電エアロゾルのHEPAフィルタに対するDF値(■)が示されている。図の結果から、棒状金網電極に $\ominus$ の電位を与えた場合には、エアロゾルのDF値が著しく大きくなっていることが分かる。

## (7) 帯電エアロゾルのDF値

図3. 13は、棒状金網電極に⊕と⊖の電位を与えた場合の帯電エアロゾルのDF値を示した。このDF値は、TRAPOLに流入するエアロゾルの粒子数濃度をTRAPOLから流出してHEPAフィルタで捕集された後の粒子数濃度で割った値として定義されている。従って、このDF値にはTRAPOL内の沈着効果、HEPAフィルタの捕集効果、及びフィルタ手前において導入した空気の希釈効果が含まれていることに注意されたい。図中には、 $\gamma$ 線を照射せず、電場もかけない場合(■印)の通常のHEPAフィルタのDF値も示されている。また、図中の●印はTRAPOLに $\gamma$ 線を照射し、棒状金網電極に⊕の電位を与えた場合のDF値、▲印は $\gamma$ 線を照射し、棒状金網電極に⊖の電位を与えた場合のDF値である。通常のHEPAフィルタのDF値は、フィルタによる捕集が困難な $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ の粒径に対して $DF\sim 10^3$ である。実験の結果から、帯電エアロゾルのHEPAフィルタに対するDF値は、棒状金網電極に⊖の電位を与えた場合には約 $10^7$ まで、⊕の電位を与えた場合には約 $10^6$ まで上昇する。以上の結果から、TRAPOLとHEPAフィルタを組み合わせたDF値は、希釈器の希釈倍率の分を考慮すると、通常のHEPAフィルタのDF値に比較して、 $100\sim 1000$ 倍程向上したことが分かる。

表 3.1 HEPA フィルタの諸元

HEPA フィルタの寸法 (mm) :	203 x 203 x 39t
濾材の面積 (m <sup>2</sup> ) :	0.195
濾材の厚み (mm) :	0.38
フィルタ繊維の直径 (μm) :	0.63
定格のフィルタ線速度 (m/s) :	0.0363
濾材の空隙率 (-)	~0.95
フィルタの充填率 (-) :	~0.05
フィルタの圧力損失 (mmaq) :	25.4
捕集効率 (%)	99.97%以上 (=0.3 μm DOP)

表 3.2 実験の条件 (図 3.1 のフローシート参照)

(1) TRAPOL の容積 (cm <sup>3</sup> )	216
(2) 実験装置内の流量	
エアロゾル発生器からTRAPOLに入るアルゴンの流量 (FM-1) :	3.5 ℓ/min
HEPAフィルタ上流側の希釈器 (MX-1) に入る空気流量 (FM-3) :	440.0 ℓ/min
エアロゾル発生器上流側の希釈器 (MX-2) に入る空気流量 (FM-2) :	50.0 ℓ/min
フィルタ上流側からMX-2に入る希釈空気流量 (FM-4) :	0.97 ℓ/min
MX-2からエアロゾル発生器に入る空気流量 (FM-4) :	0.98 ℓ/min
(3) エアロゾルの希釈率	
希釈器 (MX-1) におけるエアロゾルの希釈倍率 :	443.5/3.5=127倍
希釈器 (MX-2) におけるエアロゾルの希釈倍率 :	50.98/0.98=52倍
(4) エアロゾル発生器へのDOPの供給量 :	0.11cm <sup>3</sup> /min
(5) HEPAフィルタの捕集効率 (%) :	99.97%(DF=3000)
(6) 印加電圧 (直流) :	1000 V
(7) 飽和電流 (直流) :	5~8 μA
(8) <sup>60</sup> Co放射能 :	240TBq(6500Ci)
(9) 線量率 (実測値) :	4.3x10 <sup>-2</sup> C/kg·s(6x10 <sup>5</sup> R/h)

表 3.3 実験番号と実験条件のマトリックス

実験番号 (No.)	$\gamma$ 線の有無	電圧の有無	エアロゾルの測定位置		備 考	
	240TBq Const.	(1000V) Const.	HEPAフィルタの 上流側	HEPAフィルタの 下流側		
A-1 A-2 A-3	×	×	○	×	$\gamma$ 線照射無し 電位差無し 無帯電のI707 <sup>μ</sup> ル	
B-1 B-2	×	×	×	○		
C-1A C-1B C-1C C-2A C-2B	○	○	×	○		$\gamma$ 線照射有り 棒状電極の 極性は(+) ⊕に帯電した I707 <sup>μ</sup> ルの効果
D-1A D-1B D-2A	○	×	○	×		
E-1A E-1B E-1C E-2A E-2B	○	○	○	×		
F-1A F-1B F-2A F-2B	○	×	×	○	$\gamma$ 線照射有り 電位差無し 凝集の効果	
	○	×	×	○		
	○	×	○	×		
	○	×	○	×		

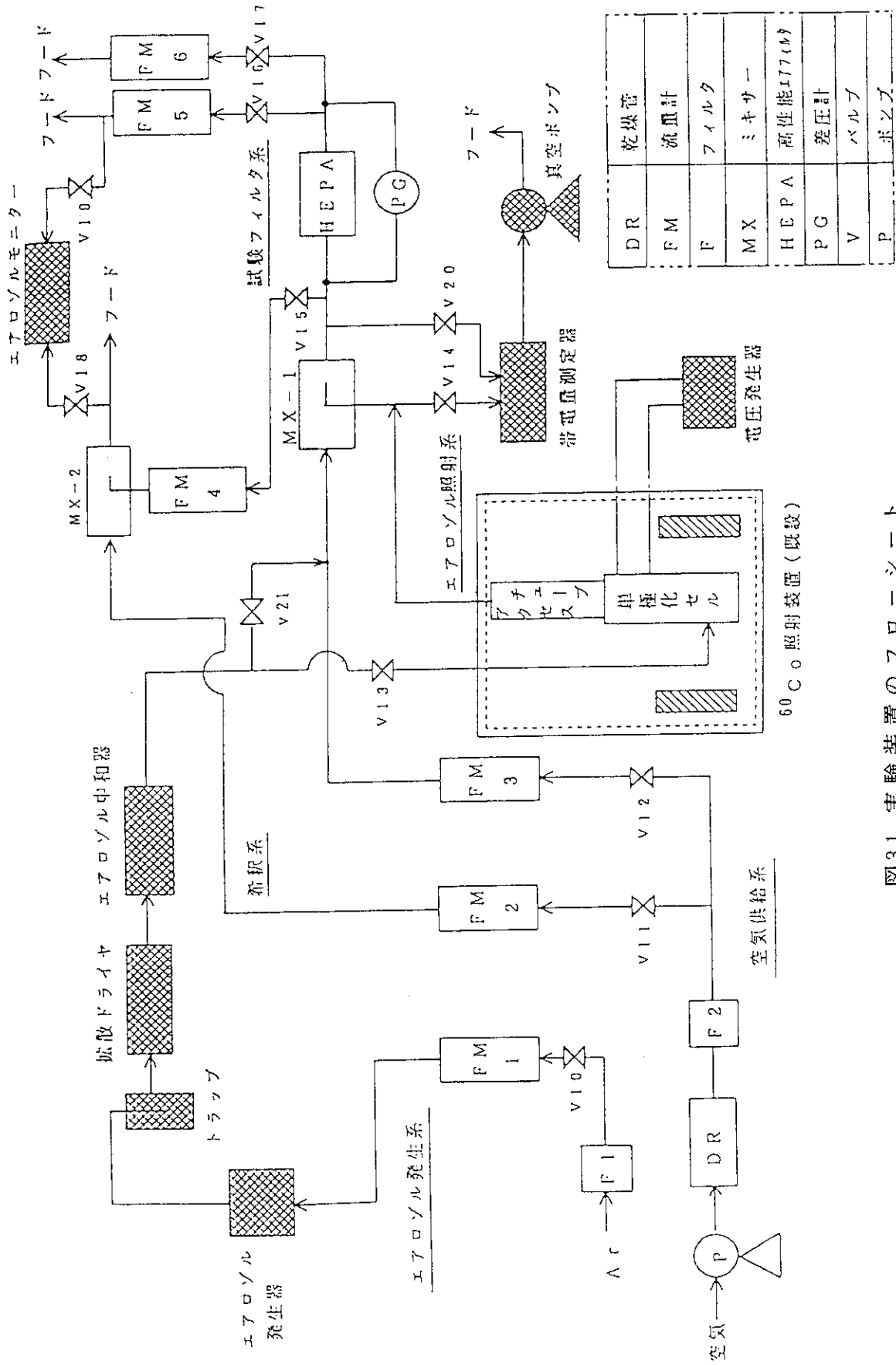


図3.1 実験装置のフローシート

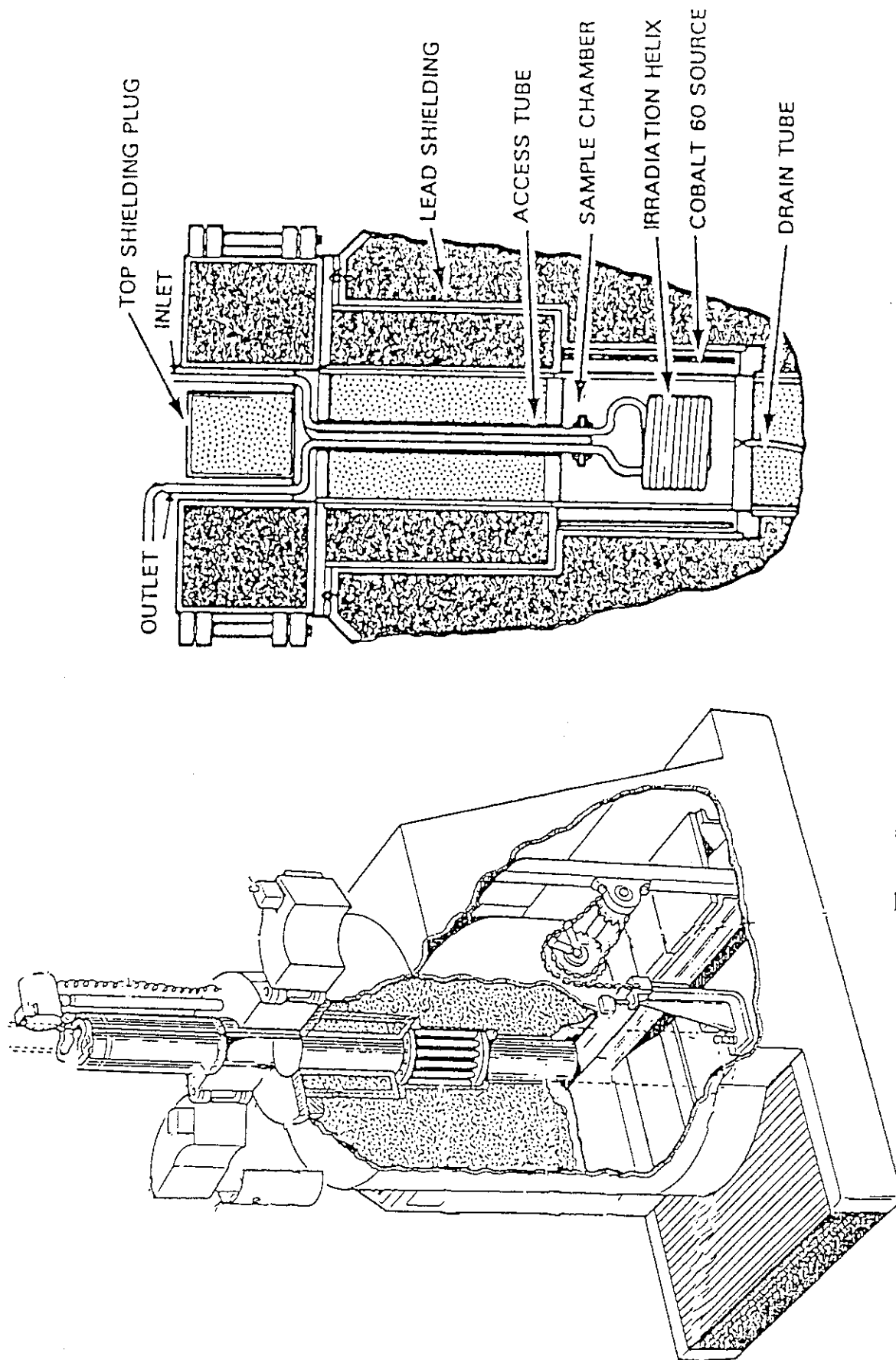
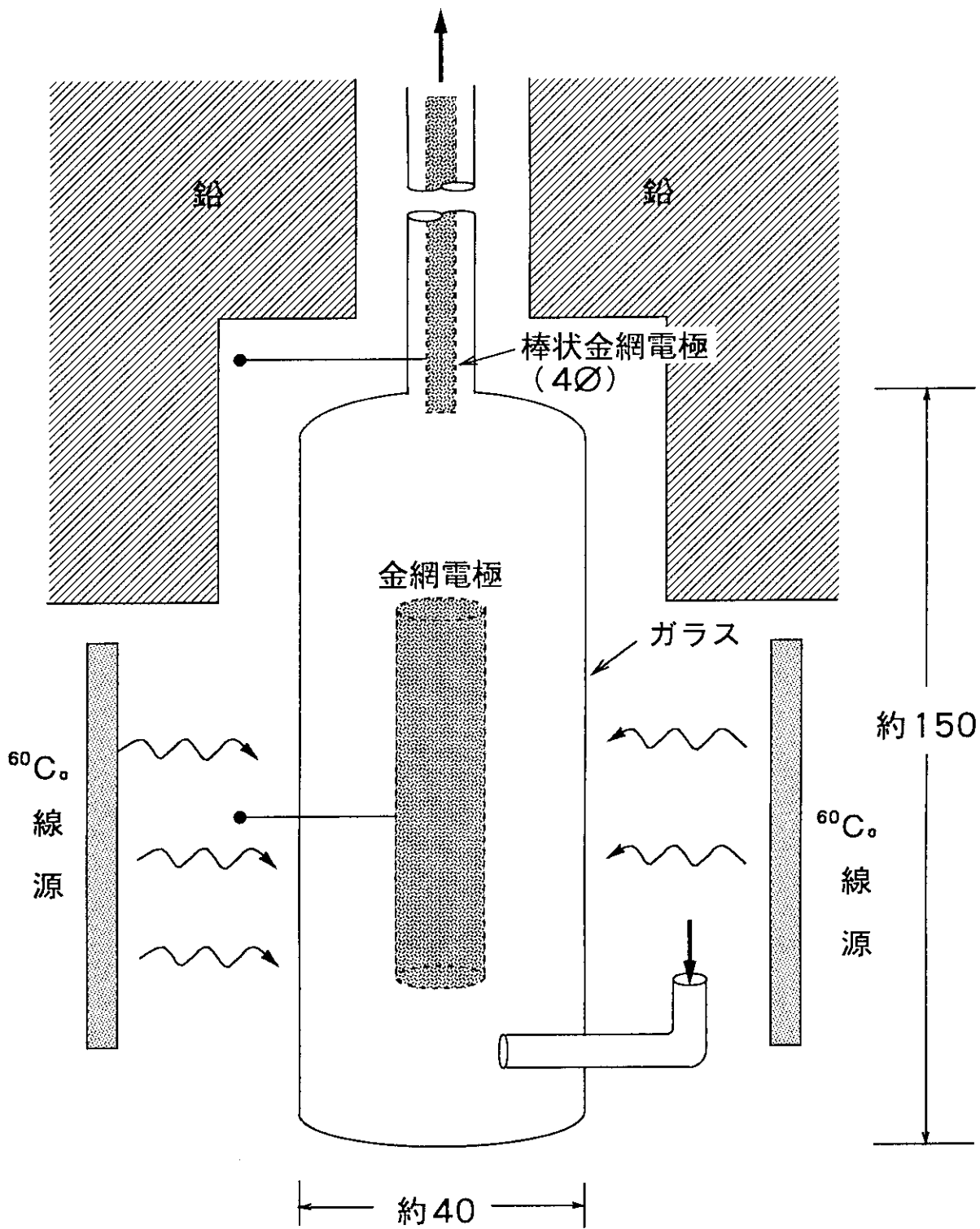


図 3.2  $^{60}\text{Co}$  照射装置の鳥瞰図と照射部の構造





$V = 216\text{cm}^3$   
(セル体積)

図 3.3 ガンマ線照射による単極拡散荷電セル (TRAPOL)

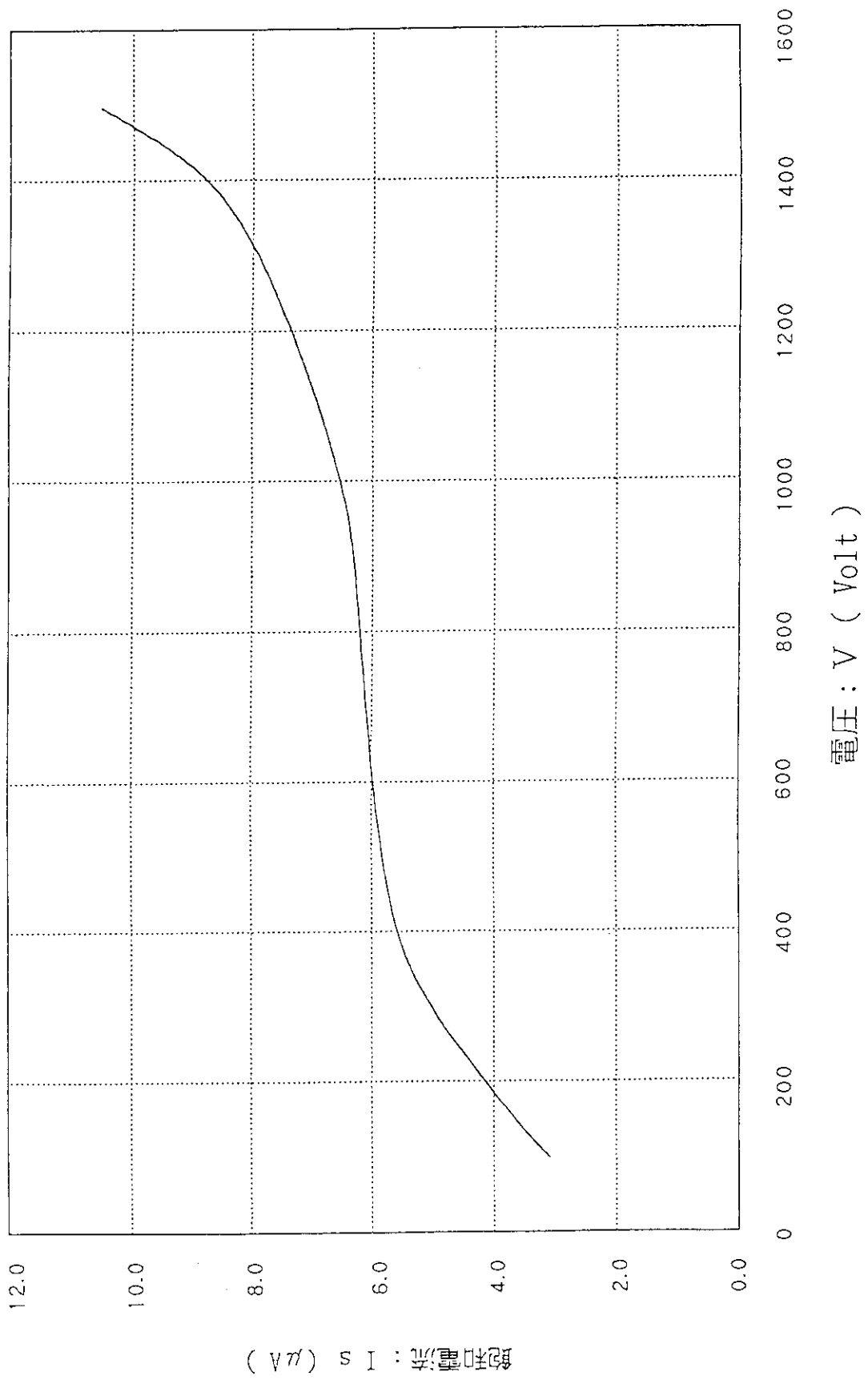


図 3.4  $\gamma$ 線照射下の電圧と飽和電流の関係 (プラトー電流)

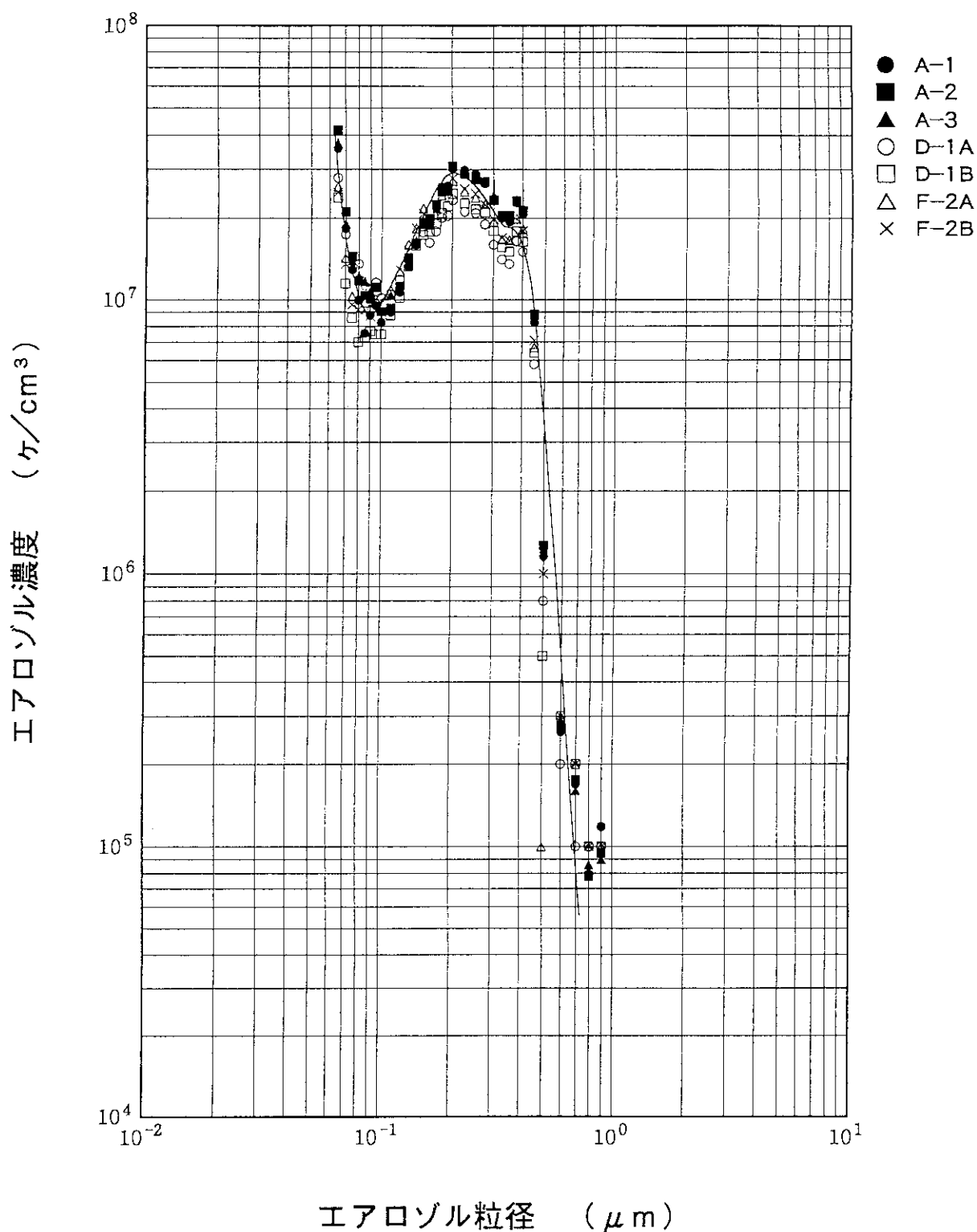


図 3.5 TRAPOL 出口のエアロゾルの濃度分布 (電圧:  $V = 0$ )  
 白印:  $\gamma$ 線照射下, 黒印:  $\gamma$ 線照射無し, (凝集効果の有無)

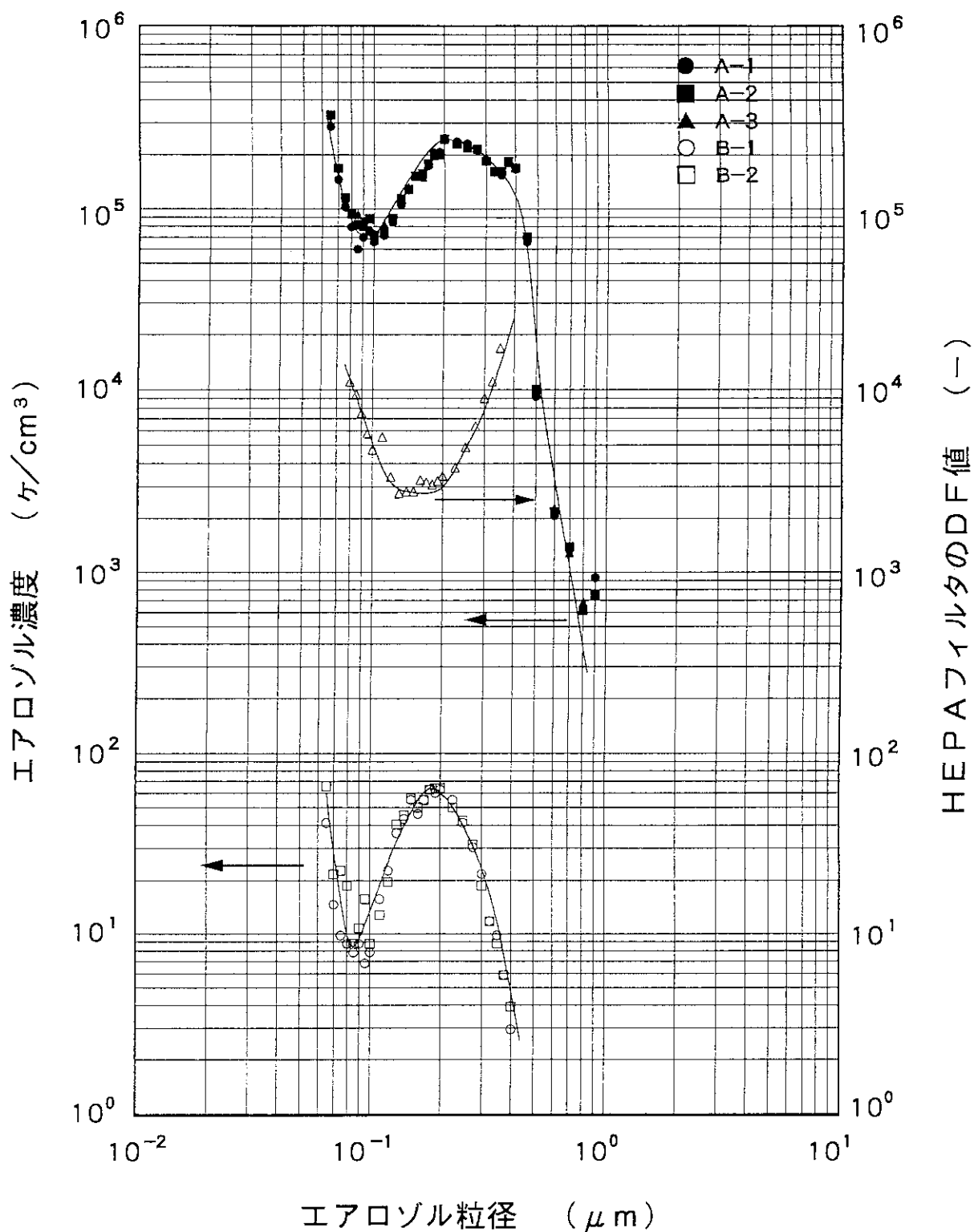


図3.6 HEPA フィルタ前後のエアロゾルの濃度分布と DF 値  
 $\gamma$ 線照射なし (電圧:  $V = 0$ )

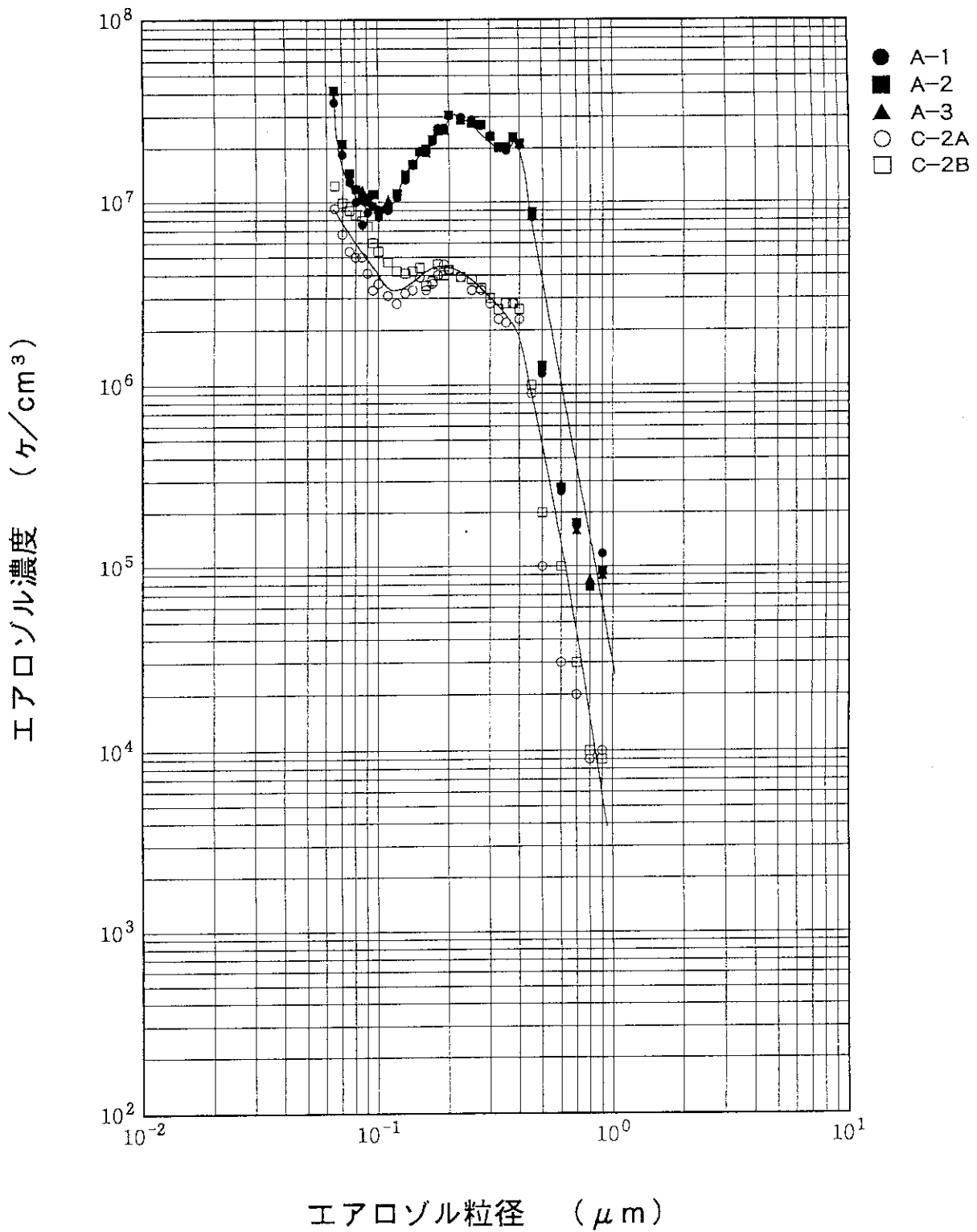


図 3.7 TRAPOL 入口の無帯電エアロゾルと TRAPOL 出口の帯電エアロゾル (⊕) の濃度分布の比較

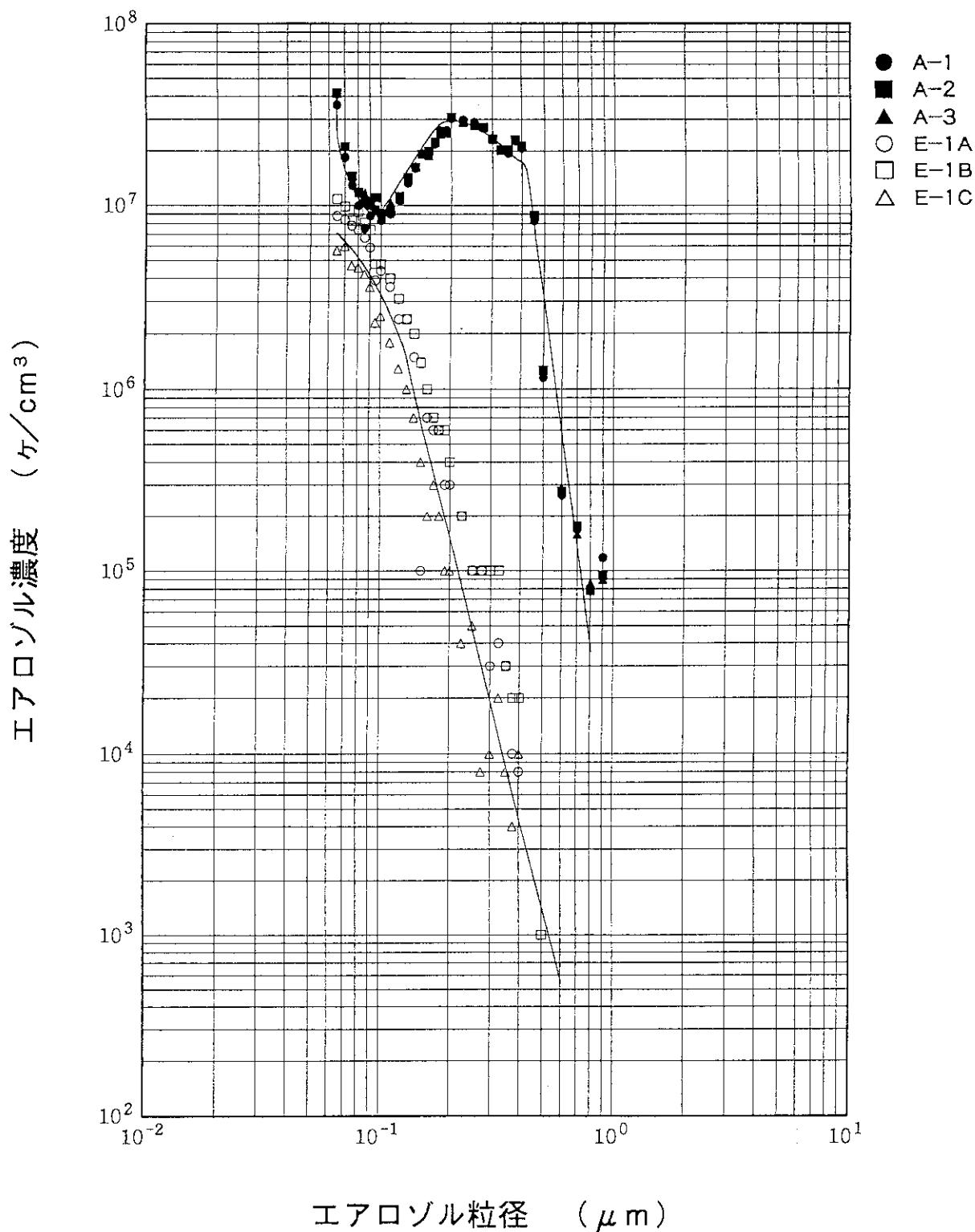


図 3.8 TRAPOL 入口の無帯電エアロゾルと TRAPOL 出口の帯電エアロゾル (⊖) の濃度分布の比較

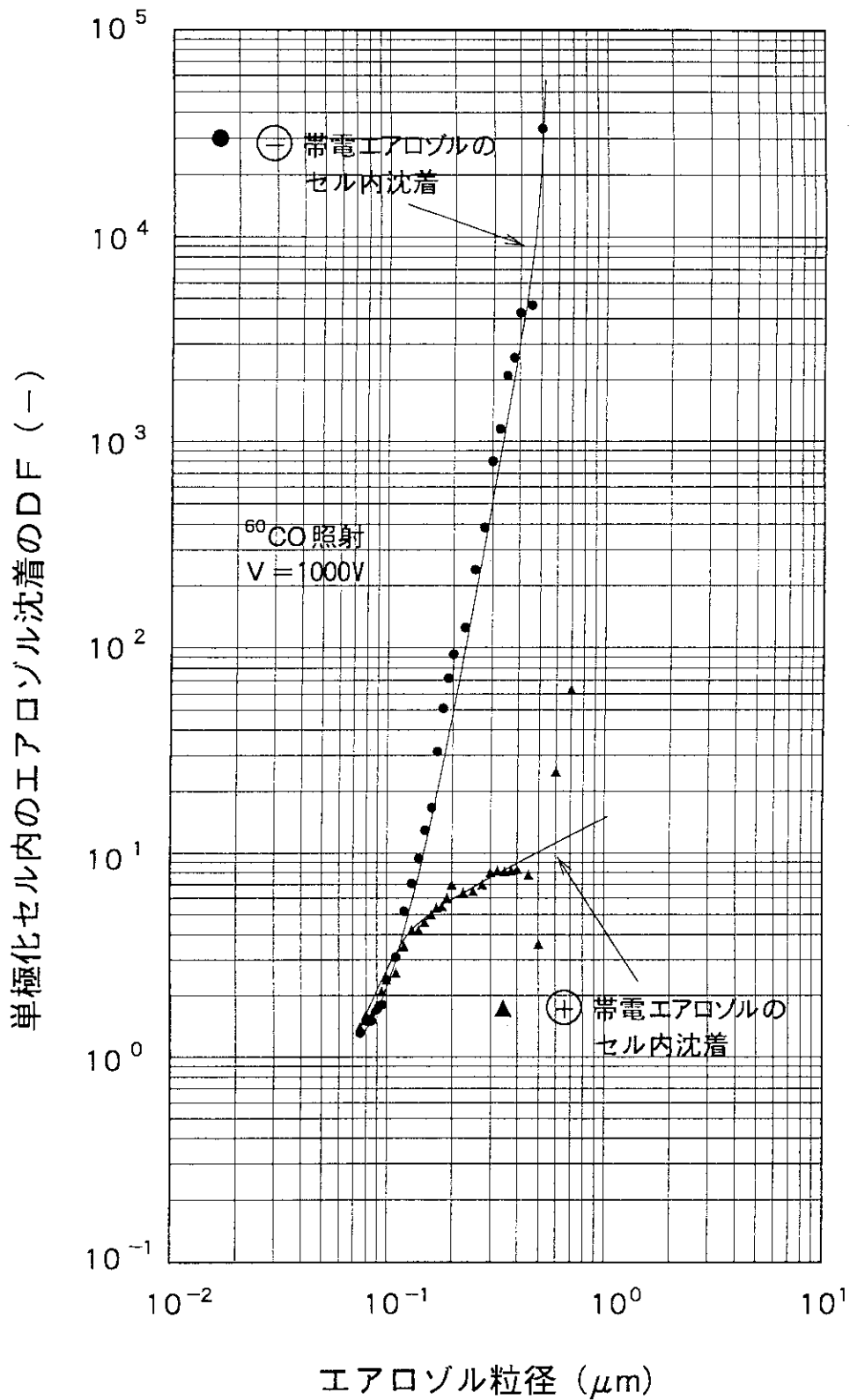


図 3.9  $\gamma$ 線照射下の TRAPOL 内における  $\oplus$  と  $\ominus$  の帯電エアロゾルに対する沈着の DF 値

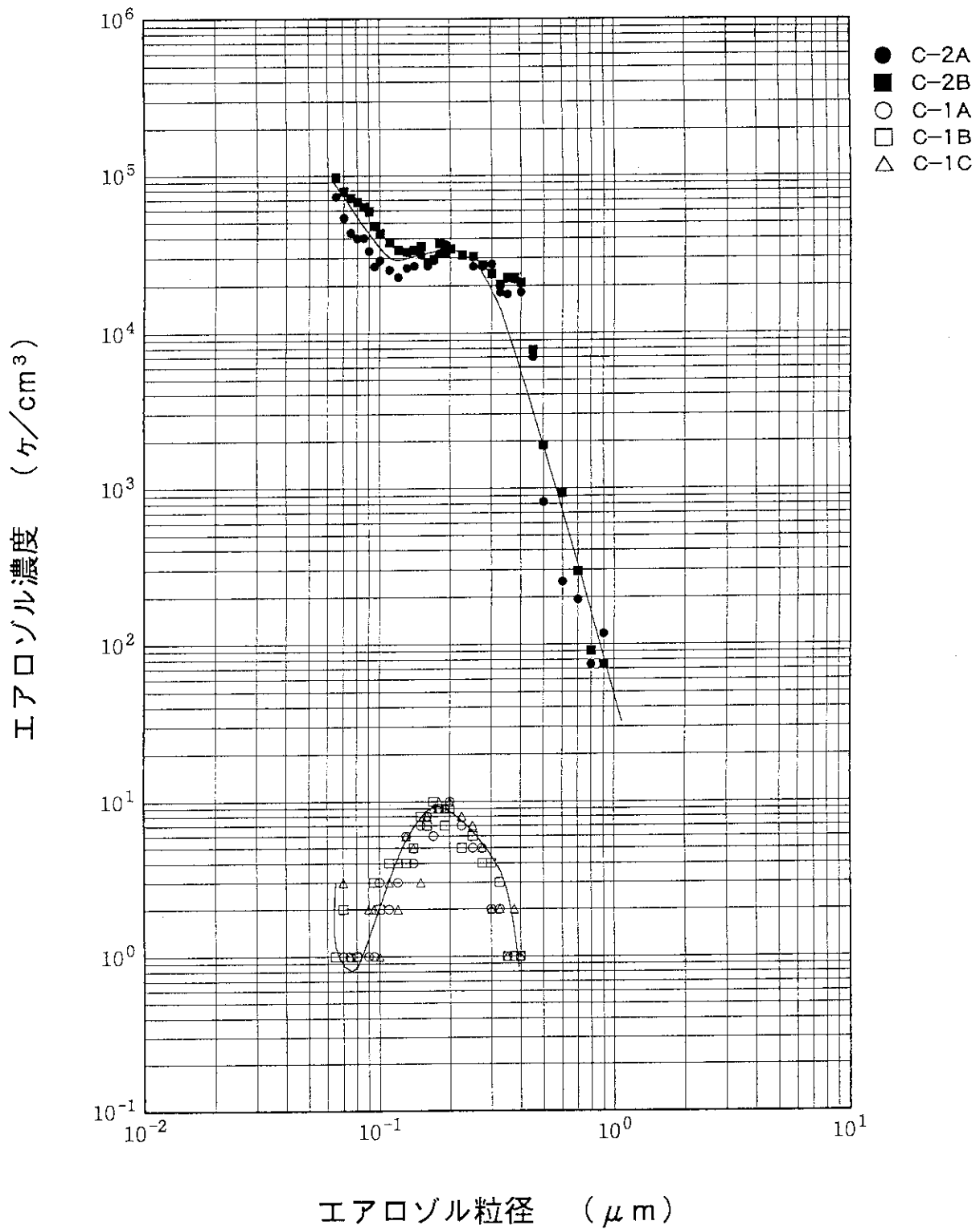


図3.10 HEPA フィルタ前後の帯電エアロゾル (⊕) の濃度分布  
(電圧 = 1000V, γ線照射あり)



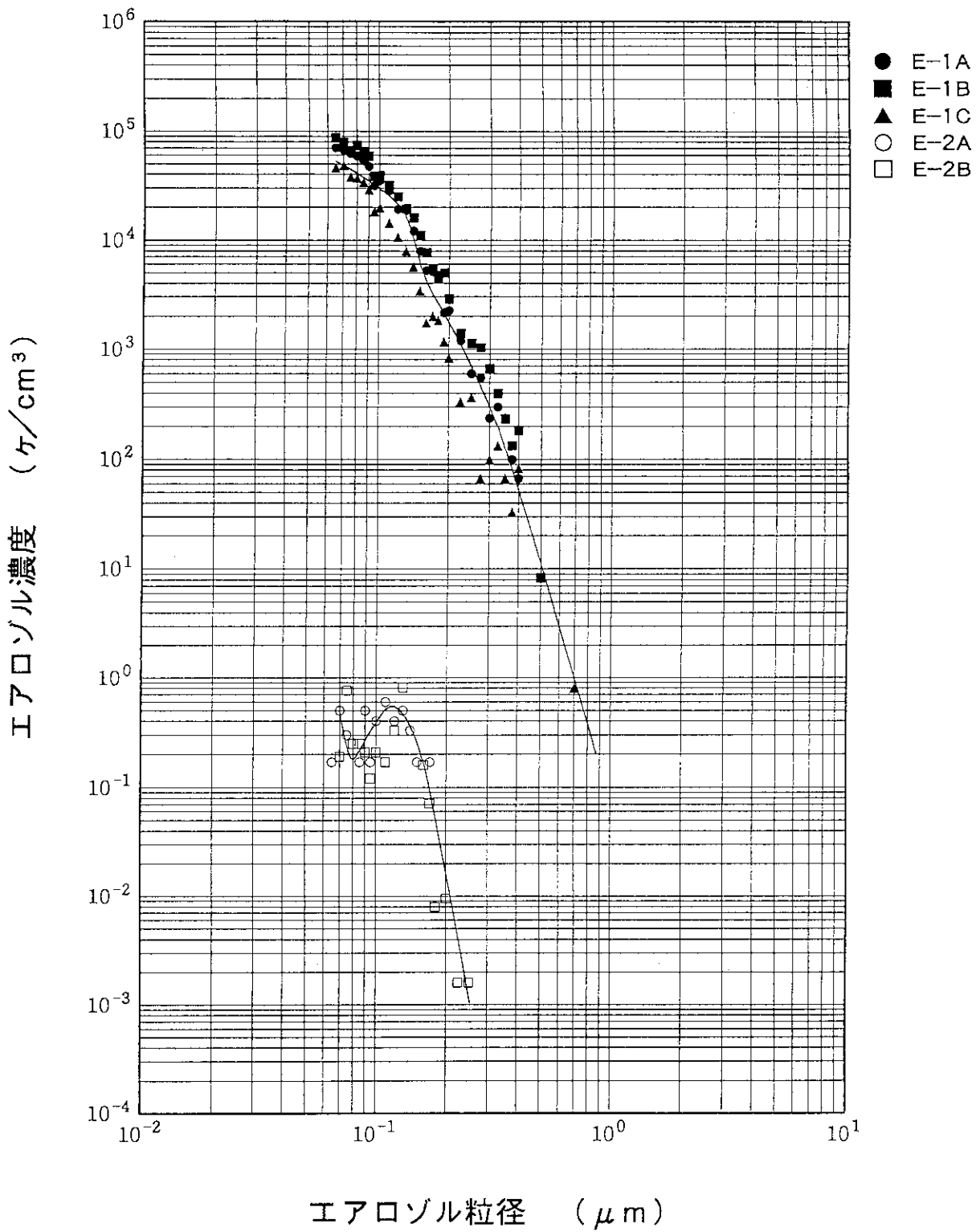


図 3.11 HEPA フィルタ前後の帯電エアロゾル (⊖) の濃度分布

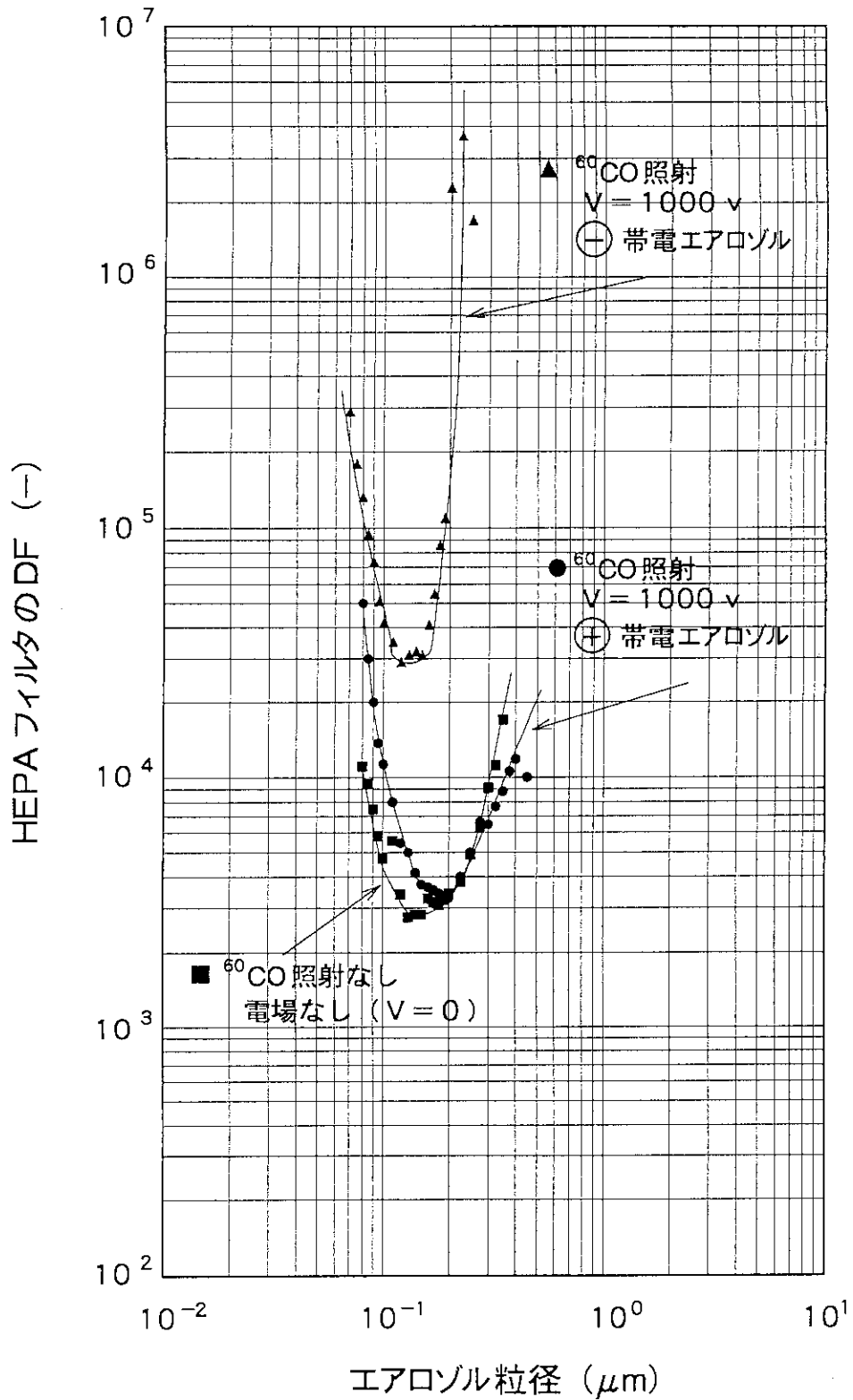


図3.12  $\oplus$ と $\ominus$ に帯電したエアロゾル粒子の影像力により向上したHEPAフィルタのDF値

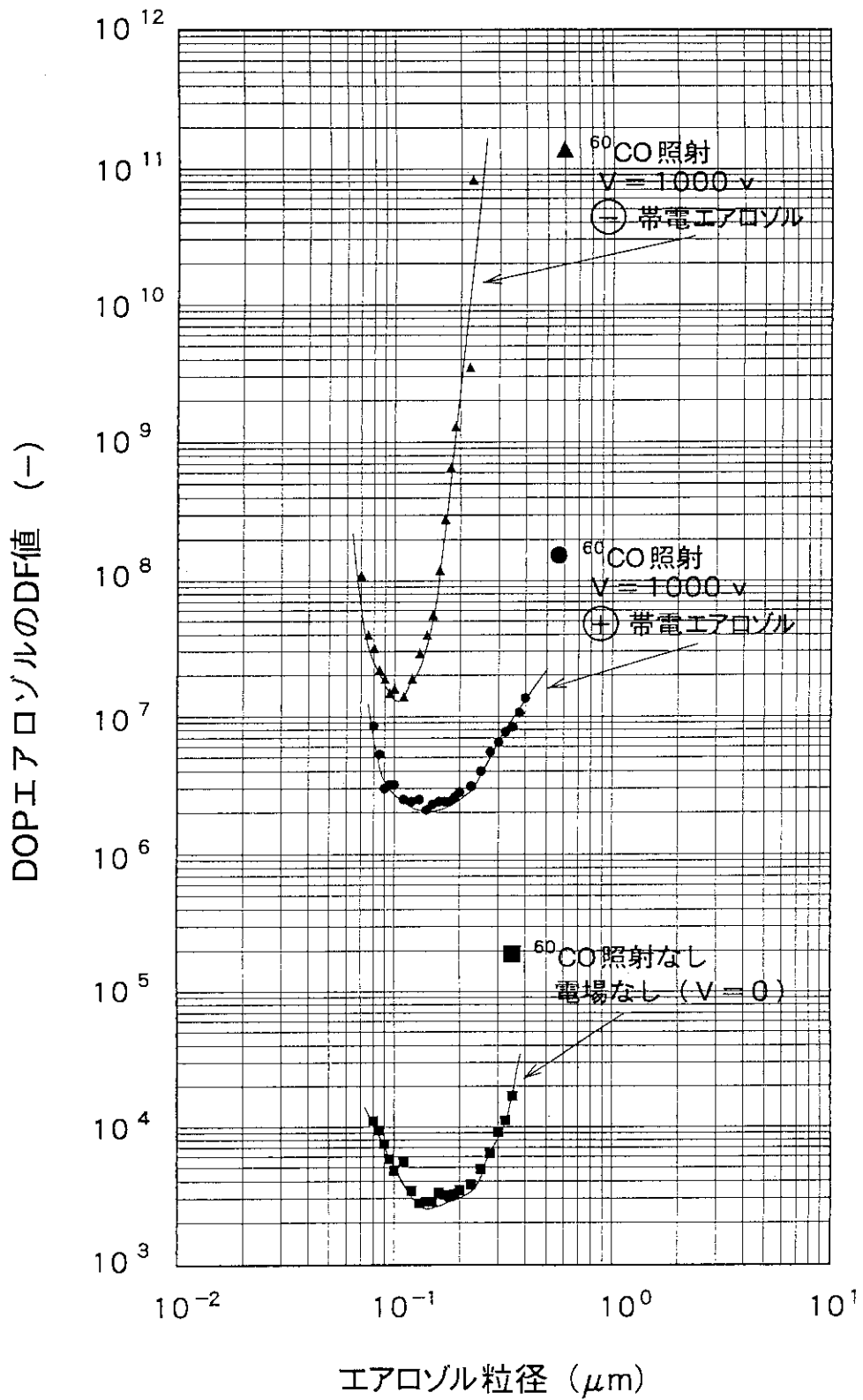


図3.13 HEPA フィルタに対する帯電エアロゾルのDF値

## 4. 理論的背景と計算結果

### 4. 1 微粒子の帯電効果

#### (1) 放射線の強さと電離イオン対の数

1 レントゲンの放射線は、 $1 \text{ cm}^3$ の乾燥空気中に $2.082 \times 10^9$ ヶの電離イオン対をつくるので、放射線の強さが $R$  ( $R/h$ )の照射下で生成する単位体積当たりの電離イオン対の数 ( $\text{イオン対}/\text{cm}^3$ )は、

$$N = \frac{2.082 \times 10^9 \times R}{3600} \quad (4.1)$$

になる。放射線の照射下において、TRAPOLを通過するガスに直流電圧をかけると、放射線により電離した正負イオン対の数に比例した飽和電流が流れる。この飽和電流は放射線の強さとTRAPOLの構造で変化し、電圧に無関係に一定の電流値 (プレート電流)を示す。この飽和電流は電離イオン対の数に比例しているため、単位体積当たりの電離イオン対の数は次式で与えられる。

$$N = \frac{i t}{e V_c} \quad (4.2)$$

ここで、 $V_c$ はTRAPOLの体積、 $i$ は飽和電流、 $t$ はTRAPOL内の雰囲気ガスの滞留時間、 $e$ は電子1個の荷電量 ( $=1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$ )である。

#### (2) 拡散荷電

微粒子の帯電効果には拡散荷電と電界荷電がある。拡散荷電では、単極の電離イオンがブラウン運動により微粒子と衝突し、微粒子を単極イオンと同じ電荷に帯電させる。しかし、微粒子上に電荷が蓄積するにつれて電離イオンを跳ね返す電場が生じるので、エアロゾルに衝突するイオンの割合は次第に小さくなる。いま、単極化した電離イオンを $N$  ( $\text{ヶ}/\text{cm}^3$ )だけ含む雰囲気中において、直径 $d_p$ の微粒子が単極イオンと衝突し、1ヶの微粒子上に $t$ 秒間に帯電する電荷数は近似的に次式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$n_1(t) = \frac{\kappa T d_p}{2 e^2} \ln \left[ 1 + \frac{\pi d_p C_{av} e^2 N t}{2 \kappa T} \right] \quad (4.3)$$

ここで、 $\kappa$ はボルツマン定数 ( $=1.38 \times 10^{-16} \text{ dyn-cm/K}$ )、 $e$ は静電単位で表した電気素量 ( $=4.8 \times 10^{-10} \text{ stC}$ )、 $C_{av}$ は電離イオンの平均速度 ( $=2.4 \times 10^4 \text{ cm/s}$ )、 $T$ は絶対温度 (K)、 $d_p$ はエアロゾルの粒径 (cm)、 $N$ は電離イオン対濃度 ( $\text{イオン}/\text{cm}^3$ )、 $t$ は滞留時間 (s)である。

#### (3) 電界荷電

電界荷電では、強い電場による電気力線 (Field line) に沿って正と負の電離イオンがそれぞれ

電極の方向に動き、微粒子と衝突してエアロゾルを帯電させる。微粒子の誘電率 ( $\epsilon$ ) が大きい場合には、電気力線は微粒子に集中するが、微粒子に電荷が蓄積すると電離イオンは電気力線から外れてエアロゾルを帯電させる割合が小さくなる。いま、電場 ( $E$ ) 内に  $N$  ( $\text{イオン}/\text{cm}^3$ ) のイオン対が存在するとき、電界荷電により 1 個の微粒子上に  $t$  秒間に帯電する電荷数は次式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$n_z(t) = \left( \frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left( \frac{E d_p^2}{4e} \right) \left( \frac{\pi e Z_i N t}{1 + \pi e Z_i N t} \right) \quad (4.4)$$

ここで、 $Z_i$  は静電単位で表したイオンの電気移動度 ( $=450\text{cm}^2/\text{stVs}$ )、 $\epsilon$  は微粒子の誘電率 (-)、 $E$  は静電単位で表した電極間の電界強度 ( $\text{stV}$ ) である。

#### (4) 限界荷電量

エアロゾル粒子は限界まで荷電されると、微粒子から電子あるいは正イオンが放出する。この状態を限界荷電量 (Charging limit) と言う。球形の固定粒子の限界荷電量は、

$$n_{L1} = \frac{d_p^2 E_L}{4e} \quad (4.5)$$

で与えられる<sup>(1)</sup>。ここで、 $E_L$  ( $\text{stV}/\text{cm}$ ) は微粒子から自然に負イオン (電子)、又は正イオンが放出される表面電場の強さである。表面電場の強さは、正イオンに比較して負イオンの方が小さいので、 $\ominus$  粒子は  $\oplus$  粒子より若干放出が起こり易くなる。(4.5) 式中の  $e$  は静電単位で表した電子 1 個の荷電量 ( $e=4.8 \times 10^{-10}\text{stC}$ ) である。液滴粒子の限界荷電量は Rayleigh 限界と呼ばれ、電荷の反発力が液滴の表面張力 ( $\gamma$ ) を超えると、液滴が分裂して小さな液滴微粒子となる。この限界荷電量は、以下の式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$n_{L2} = \frac{(2\pi\gamma d_p^3)^{1/2}}{e} \quad (4.6)$$

### 4. 2 無帯電粒子のフィルタ捕集理論

#### (1) 捕集効率と DF 値

フィルタ上流側の粒子数濃度を  $C_0$  ( $\text{ヶ}/\text{cm}^3$ )、下流側の粒子数濃度を  $C$  とすれば、フィルタの捕集効率は

$$E = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \quad (4.7)$$

である。また、除染係数 (DF 値) は以下の式で与えられる。

$$DF = \frac{1}{1 - E} \quad (4.8)$$

## (2) フィルタの捕集理論

HEPAフィルタによる無帯電粒子の捕集理論は、Kirschによるエアロゾル粒子の単一繊維さえぎりモデルが有名である<sup>(8)</sup>。ここでは、Kirschの理論式を用いて、HEPAフィルタによる無帯電粒子の捕集効率を求めてみる。捕集効率(E)は、単一繊維さえぎり効率( $\eta_{D1}$ )の理論から、

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{4}{\pi} \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{L \eta_{D1}}{d_f}\right) \quad (4.9)$$

で与えられる。従って、 $\eta_{D1}$ が決定できればDF値が計算できる。ここで、 $\alpha$ はフィルタ繊維の充填率、Lはフィルタの厚さ、 $d_f$ はフィルタ繊維の直径である。

## (3) 単一繊維さえぎりモデル

Kirschは、単一繊維のさえぎり効率( $\eta_{D1}$ )が拡散さえぎり効率( $\eta_D$ )と慣性さえぎり効率( $\eta_I$ )の和で与えられるとし、以下の理論式を導出した。

$$\eta_{D1} = \eta_D + \eta_I + f(\text{Pe}, R_0) \quad (4.10)$$

ここで、 $\eta_D$ はフィルタ繊維上に微粒子が拡散さえぎり効果により捕捉される効率、 $\eta_I$ はフィルタ繊維上に慣性さえぎりにより捕捉される効率である。また、(4.10)式中の $f(\text{Pe}, R_0)$ は $\eta_D$ と $\eta_I$ が関与した複合さえぎり効果が関係した効率である。ここで、Peはペクレ数( $=u_0 d_f / D_B$ )、 $u_0$ は流体の流速、 $D_B$ は微粒子の拡散係数、 $R_0$ は微粒子のさえぎりパラメータ( $=d_p / d_f$ )である。(4.10)式中の $\eta_D$ と $\eta_I$ 、及び $f(\text{Pe}, R_0)$ は以下の式で与えられる。

$$\eta_D = 2.7 \text{Pe}^{-2/3} (1 + 0.39 \text{k}^{-1/3} \text{Pe}^{1/3} \text{Kn}) + 0.624 \text{Pe}^{-1} \quad (4.11)$$

$$\eta_I = (2\text{k})^{-1} [(1+R_0)^{-1} - (1+R_0) + 2(1+R_0) \ln(1+R_0) + 2.86(2+R_0)R_0(1+R_0)^{-1} \text{Kn}] \quad (4.12)$$

$$f(\text{Pe}, R_0) = 1.24 \text{k}^{-1/2} \text{Pe}^{-1/2} R_0^{2/3} \quad (4.13)$$

ここで、Knはクヌッセン数である。(4.11)～(4.13)式中のkは水力学因子と呼ばれ、フィルタ繊維の充填率( $\alpha$ )と繊維径の分散( $\sigma$ )の値を用いて、

$$k = -0.5 \ln[\alpha/(1+\sigma)] - 0.52 + 0.64[\alpha/(1+\sigma)] + 1.43[1 - (\alpha/(1+\sigma))] \text{Kn} \quad (4.14)$$

で与えられる。(4.10)～(4.14)式より求めた $\eta_{D1}$ を(4.9)式に代入すれば、HEPAフィルタによる無帯電エアロゾル粒子の捕集効率(E)が決定できる。

## 4.3 帯電粒子のフィルタ捕集理論

表4.1にフィルタ繊維に働くエアロゾル粒子の静電力の種類とフィルタ繊維に働く無次元パラメータを示した<sup>(2)</sup>。

帯電したエアロゾル粒子をHEPAフィルタに流すと、帯電粒子の影像力がフィルタの繊維に働き、フィルタの捕集効率が向上する。吉岡<sup>(5)</sup>および高橋<sup>(4)</sup>らは、帯電エアロゾルの影像力がフィルタ繊維に与える効果について実験と理論的解析を行った。高橋の理論によると、帯電した微粒子

の単一繊維に対する帯電さえぎり効率 ( $\eta_e$ ) は、以下の式で与えられるとした。

$$\eta_e = 2 (K_M / k)^{1/2} \quad (4.15)$$

$$K_M = \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \frac{C_m q^2}{12 \pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f^2 u_0} \quad (4.16)$$

ここで、 $K_M$  (-) は表 4. 1 に示した影像力の無次元パラメータ、 $\epsilon_f$  (-) と  $\epsilon_0$  (-) はフィルタ繊維と空気の誘電率、 $q$  (C) はエアロゾル粒子上の荷電量、 $d_p$  (cm) と  $d_f$  (cm) は微粒子と繊維の直径、 $u_0$  (cm/s) は流体の流速、 $C_m$  (-) はカニンガム定数、 $\mu$  (g/cms) は粘性係数である。ここで、 $\alpha$  (-) をフィルタ繊維の充填率とすれば、(4.15) 式中の水力学因子  $k$  は以下の式で与えられる。

$$k = -0.51 \ln \alpha + \alpha - 0.25 \alpha^2 - 0.75 \quad (4.17)$$

従って、帯電粒子の影像力に起因したフィルタの捕集効率 ( $E_e$ ) は、(4.9) 式と同様に以下の式で与えられる。

$$E_e = 1 - \exp \left( - \frac{4}{\pi} \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{L \eta_e}{d_f \delta} \right) \quad (4.18)$$

#### 4. 4 微粒子の帯電計算

##### (1) 計算の前提

実験に使用した<sup>60</sup>C<sup>o</sup>照射装置は、放射能が約240TBq、線量率が約 $4.3 \times 10^{-2}$  C/kg $\cdot$ sの能力をもつ小型ガンマ線照射セルである(図3. 2参照)。 $\gamma$ 線の照射部には、TRAPOLが設置されており、その内部には円筒状の金網電極(照射部)と棒状の金網電極(遮蔽部)が取り付けられている(図3. 3参照)。DOPはエアロゾル発生器に導入され、高純度アルゴンにて $0.11 \text{ cm}^3/\text{min}$ の流量で噴霧される。噴霧された大粒子はトラップされ、TRAPOLには $1 \mu\text{m}$ 以下の粒度分布をもつ無帯電エアロゾルが入る。TRAPOL内のエアロゾルの滞留時間は3.7秒である。表4. 2に計算の前提になる諸数値を示した。TRAPOLの電極を流れる飽和電流は、<sup>60</sup>C<sup>o</sup>照射装置の $\gamma$ 線の強さに比例している(図3. 4参照)。いま、TRAPOLの容積を $V_c = 216 \text{ cm}^3$ 、電極を流れる飽和電流を $i = 6.5 \times 10^{-6} \text{ A}$ 、TRAPOL内の雰囲気ガスの滞留時間を $t = 3.7 \text{ s}$ 、電子1個の電気素量を $e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$ とすると、TRAPOL内で電離したイオン対の数(イ<sup>+</sup>対/cm<sup>3</sup>)は(4.2)式により与えられる。

$$N_i = \frac{i t}{e V_c} = \frac{6.5 \times 10^{-6} \times 3.7}{1.60219 \times 10^{-19} \times 216} = 6.95 \times 10^{11} \text{ (イ}^+\text{対/cm}^3\text{)} \quad (4.19)$$

## (2) 拡散荷電による帯電

ここでは、拡散により1ケのエアロゾル粒子に帯電し得る電荷数をエアロゾルの粒径毎に計算する。TRAPOL内で電離したイオン対の濃度は $N_i=6.95 \times 10^{11}$  (イオン対/cm<sup>3</sup>)、滞留時間は $t=3.7$ 秒であるので、(4.3)式から拡散荷電効果により1ケの微粒子に帯電する荷電数(ケ)は

$$\begin{aligned} n_1(t) &= \frac{\kappa T d_p}{2 e^2} \ln \left[ 1 + \frac{\pi d_p C_{av} e^2 N t}{2 \kappa T} \right] \\ &= \frac{(d_p)(1.38 \times 10^{-16})(293)}{(2)(4.8 \times 10^{-10})^2} \ln \left[ 1 + \frac{\pi (d_p)(2.4 \times 10^4)(4.8 \times 10^{-10})^2(6.95 \times 10^{11})(3.7)}{(2)(1.38 \times 10^{-16})(293)} \right] \\ &= 8.77 \times 10^4 d_p \ln [1 + 5.52 \times 10^{11} d_p] \end{aligned} \quad (4.20)$$

である。ここで、 $\kappa$ はボルツマン定数(= $1.38 \times 10^{-16}$  dyn-cm/K)、 $e$ は静電単位で表した電気素量(= $4.8 \times 10^{-10}$  stC)、 $C_{av}$ は電離したイオンの平均速度( $2.4 \times 10^4$  cm/s)、 $T$ は絶対温度(= $293$  K)、 $d_p$ はエアロゾルの粒径(cm)、 $N$ は電離イオン対の濃度(= $6.95 \times 10^{11}$  イオン対/cm<sup>3</sup>)、 $t$ は滞留時間(= $3.7$  s)である。

## (3) 電界荷電による帯電効果

(4.4)式から、電界荷電により1ケのエアロゾル粒子に帯電する電荷数は、

$$\begin{aligned} n_2(t) &= \left( \frac{3 \varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left( \frac{E d_p^2}{4 e} \right) \left( \frac{\pi e Z_i N t}{1 + \pi e Z_i N t} \right) \\ &= \frac{(3)(2.1)}{(2.1 + 2)} \frac{(1000/300)(d_p)^2}{(4)(4.8 \times 10^{-10})} \frac{(3.14)(4.8 \times 10^{-10})(450)(6.95 \times 10^{11})(3.7)}{1 + (3.14)(4.8 \times 10^{-10})(450)(6.95 \times 10^{11})(3.7)} \\ &= 2.67 \times 10^9 (d_p)^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

である。ここで、 $\varepsilon$ はDOPの誘電率(= $2.1$ )、 $Z_i$ は静電単位で表したイオンの電気移動度(= $450$  cm<sup>2</sup>/stVs)、 $E$ は静電単位で表した電極間の電界強度(= $1000/300$  stV)である。

## (4) エアロゾル粒子の荷電数

表4.3に(4.20)式と(4.21)式を用いて、サブミクロン領域にある1ケのエアロゾル粒子に帯電する電荷数を粒径毎に計算した結果を示した。表中には、拡散荷電および電界荷電に起因してエアロゾル上に荷電した電荷数、及び両帯電効果の合計値を示した。計算値は、1ケの微粒子がTRAPOLに流入した場合に帯電する荷電数である。計算の結果から、 $\gamma$ 線照射によるエアロゾルの帯電は拡散荷電効果が大きく支配していることが分かる。図4.1に、拡散荷電と電界荷電に起因したエアロゾル粒子の電荷数をエアロゾルの粒径に対して示した。なお、エアロゾルの帯電分布を求めるためには、表4.3の電荷数にエアロゾルの粒度分布関数 $f(r_p)$ をかければよい。



#### 4.5 HEP Aフィルタによるエアロゾルの捕集効率

##### (1) 無帯電エアロゾルのDF値

ここでは、HEP Aフィルタに対する無帯電エアロゾルのDF値をKirschのモデルから計算する。表4.4にHEP Aフィルタの仕様と物性値を示した。無帯電エアロゾルのDF値は、(4.11)式～(4.14)式を解いて(4.10)式から $\eta_{D1}$ を求める。計算した $\eta_{D1}$ は、(4.9)式に代入し、(4.8)式からDF値を決定する。表4.5にHEP Aフィルタに対する無帯電エアロゾルのDF値を示した。表中には、HEP Aフィルタを通過するエアロゾルの線流速(m/s)を定格値の1/2倍(3.6m/s)、1倍(7.1m/s)、2倍(14.2m/s)とし、エアロゾルの粒径とDF値の関係を求めた。無帯電エアロゾルのDF値は、大粒子側と小粒子側で極端に大きくなり、粒径が0.09~0.1の領域で最小値になる。また、DF値はフィルタを通過する空気の流速で変化し、低流速ほどDF値が大きくなる事が分かる。






##### (2) 帯電エアロゾルのDF値

高橋らは、帯電エアロゾルの影像力が単一繊維に与える帯電さえぎり効率( $\eta_e$ )を(4.15)式と(4.16)式を用いて計算できるとした<sup>(4)</sup>。ここでは、(4.15)式から $\eta_e$ を求め、その値を(4.18)式と(4.8)式に代入してDF<sub>e</sub>値を決定する。表4.6にHEP Aフィルタに対する帯電エアロゾルのDF<sub>e</sub>値をHEP Aフィルタを通過するエアロゾルの線流速(m/s)に対して示した。表中には、HEP Aフィルタに対する定格線流速(7.1m/s)、及び定格値の1/2倍(3.6m/s)と2倍(14.2m/s)のDF<sub>e</sub>値およびエアロゾルの粒径を示した。定格値における帯電エアロゾルのDF<sub>e</sub>値は、大粒子になると急激に増大する。この結果は、HEP Aフィルタに無帯電エアロゾルを流した場合に、0.09~0.1 $\mu$ mの領域のエアロゾルが漏洩するHEP Aフィルタの弱点を十分に補っている。

##### (3) 微粒子の影像力を利用したフィルタの捕集効果

図4.2は、表4.5と表4.6の結果を用いて、HEP Aフィルタに対する定格線速度(7.1m/s)におけるHEP Aフィルタの除染係数(DF値)を粒径に対して示したものである。図中の●印は、Kirschのモデルから求めた無帯電エアロゾルのDF値、■印は、帯電エアロゾルの影像力に起因したフィルタのDF<sub>e</sub>値である。●印と■印の曲線で表された2つのDF値に挟まれた2次曲線(▲印)は、無帯電エアロゾルと帯電エアロゾルの除染係数の和で表されたDF<sub>total</sub>値(=DF+DF<sub>e</sub>)である。この結果は、HEP Aフィルタに帯電したエアロゾル粒子を流すと、荷電粒子の影像力によりフィルタのDF値が著しく向上することを示している。

表 4.1 静電気力の種類とファイタ繊維に働く無次元パラメータ

静電気力の名称	静電気力の式	無次元パラメータ
(1) 外部電界をかけない場合 i) 繊維、粒子ともに帯電している場合  $\ominus \rightarrow \ominus$ クーロン力 (Coulomb force)	$F_r = -\frac{qQ}{\pi\epsilon_0 d_f r}$ $F_\theta = 0$	$K_C = \frac{C_c Q q Q}{3 \pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f \mu_0}$
ii) 粒子のみが帯電している場合 影像力 (Image force)  $\ominus \rightarrow \oplus$	$F_r = -\left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \frac{q^2}{4 \pi \epsilon_0 d_f^2 (r-1)^2}$ $F_\theta = 0$	$K_M = \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \frac{C_c q^2}{12 \pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f^2 u_0}$
iii) 繊維のみが帯電している場合 誘起力 (Induced force)  $\ominus \rightarrow \oplus$	$F_r = \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \frac{Q^2 d_p^3}{\pi \epsilon_0 d_f^3 r^3}$ $F_\theta = 0$	$K_I = \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \frac{C_c Q^2 d_p^2}{3 \pi^2 \epsilon_0 \mu d_f^3 u_0}$
(2) 外部電界をかけた場合 i) 粒子が無帯電の場合 誘電分極力 (Induced polarization force)  $\oplus \rightarrow \ominus$ $\bar{E}$	$F = \frac{\pi \epsilon_0 d_p^3}{4} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \nabla  E ^2$	$K_E = \frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \frac{C_c \epsilon_0 d_p^2 E^2}{\mu d_f u_0}$
ii) 粒子が帯電している場合 クーロン力、影像力 (Coulomb force, Image force)  $\oplus \rightarrow \ominus$ $\bar{E}$	$F = qE$	$K_C = \frac{C_c q \bar{E}}{3 \pi \mu d_p u_0}$ $K_I: (i)-(iii) \text{ と同じ}$

ここで,  $\bar{E} = E_0 \left(1 - \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \alpha\right)^{-1}$ ,  $E_0 = V/L$

表 4.2 計算に用いた諸数値

単極化セルの体積 (cm <sup>3</sup> ) :	$V_c = 216$	電子の荷電量 (C) :	$e = 1.60219 \times 10^{-19}$
$\gamma$ 線の線量率 (R/h) :	$R = 6 \times 10^5$	電界強度 (stV) :	$E = 1000/300$
単極化セルの滞留時間 (s) :	$t = 3.7$	飽和電流 ( $\mu$ A) :	$i_s = 6.5$

表 4.3 帯電エアロゾル粒子上の電荷数

粒径 $d_p$ ( $\mu$ m)	拡散荷電による電荷数 $n_d$ (ヶ)	電界荷電による電荷数 $n_f$ (ヶ)	電荷数の合計 $n_d + n_f$ (ヶ)
0.02	2.44	0.011	2.451
0.03	3.77	0.024	3.794
0.04	5.12	0.047	5.167
0.05	6.50	0.067	6.567
0.06	7.90	0.096	7.996
0.07	9.31	0.131	9.441
0.08	10.74	0.171	10.991
0.09	12.17	0.216	12.386
0.1	13.61	0.267	13.877
0.2	28.44	1.068	29.508
0.3	43.74	2.403	46.143
0.4	59.32	4.272	63.592
0.5	75.13	6.675	81.805
0.6	64.55	5.34	100.732
0.7	76.26	7.27	120.333
0.8	88.09	9.49	140.597
0.9	100.03	12.01	161.497
1.0	112.07	14.83	183.040

表 4.4 HEPA フィルタの仕様と物性値

フィルタ寸法 (mm) :	203 x 203 x 39t
濾材の面積 (m <sup>2</sup> ) :	0.39/2=0.195
フィルタファイバーの直径 (μm) :	0.63
HEPAフィルタの定格線速度 (m/s) :	7.1
空隙率 (-)	~0.95
フィルタの充填率 (-) :	~0.05
圧力損失 (mmaq) :	25.4
捕集効率 (%)	99.99%以上 (at 0.3 μm DOP)
フィルタ流量の範囲 (m <sup>3</sup> /min) :	0.0033 ~ 0.0117
α : フィルタ繊維の充填率	0.063
d <sub>f</sub> : 繊維円柱の直径 (cm)	0.54x10 <sup>-4</sup>
D <sub>B</sub> : エアロゾルの拡散係数 (cm <sup>2</sup> /s)	(C <sub>m</sub> κ T)/(3 π μ d <sub>p</sub> )
L : フィルタの厚み (cm)	0.041
u <sub>0</sub> : 繊維円柱周りの流体の近接速度 (cm/s)	(入力)
Kn : クヌッセン数 (-)	2 λ /d <sub>f</sub>
C <sub>m</sub> : カニングムの定数 (-)	1.257+0.4exp(-1.1/kn)
σ : 繊維径の分散 (-)	0.44
T : 空気流体の温度 (K)	293
μ : 空気の粘性 (dyn s/cm <sup>2</sup> )	183.0x10 <sup>-6</sup>
λ : 空気の自由走行距離 (cm)	6.45x10 <sup>-4</sup>
κ : ボルツマン定数 (erg/K)	1.38x10 <sup>-16</sup>

表4.5 HEPA フィルタの除染係数 (Kirsch)

定格線速度の 1 / 2 倍		定格線速度		定格線速度の 2 倍	
v (m/s) = 3. 6		v (m/s) = 7. 1		v (m/s) = 1 4. 2	
d <sub>p</sub> (μm)	DF	d <sub>p</sub> (μm)	DF	d <sub>p</sub> (μm)	DF
0.04	112000	0.04	4750	0.04	501
0.05	44300	0.05	2530	0.05	339
0.06	22600	0.06	1670	0.06	265
0.07	13900	0.07	1250	0.07	227
0.08	9810	0.08	1030	0.08	206
0.09	7570	0.09	899	0.09	197
0.1	6270	0.1	826	0.1	195
0.2	5690	0.2	1290	0.2	440
0.3	19400	0.3	5500	0.3	2190
0.4	117000	0.4	37700	0.4	16500

表4.6 影像力に起因した HEPA フィルタの除染係数 (DF<sub>e</sub>)

定格線速度の 1 / 2 倍		定格線速度		定格線速度の 2 倍	
v (m/s) = 3. 6		v (m/s) = 7. 1		v (m/s) = 1 4. 2	
d <sub>p</sub> (μm)	DF <sub>e</sub>	d <sub>p</sub> (μm)	DF <sub>e</sub>	d <sub>p</sub> (μm)	DF <sub>e</sub>
0.04	2760	0.04	282	0.04	54
0.05	8770	0.05	643	0.05	97
0.06	25500	0.06	1370	0.06	164
0.07	68200	0.07	2770	0.07	272
0.08	177000	0.08	5460	0.08	439
0.09	430000	0.09	10300	0.09	687
-	-	0.1	19000	0.1	1060
-	-	-	-	0.2	42400

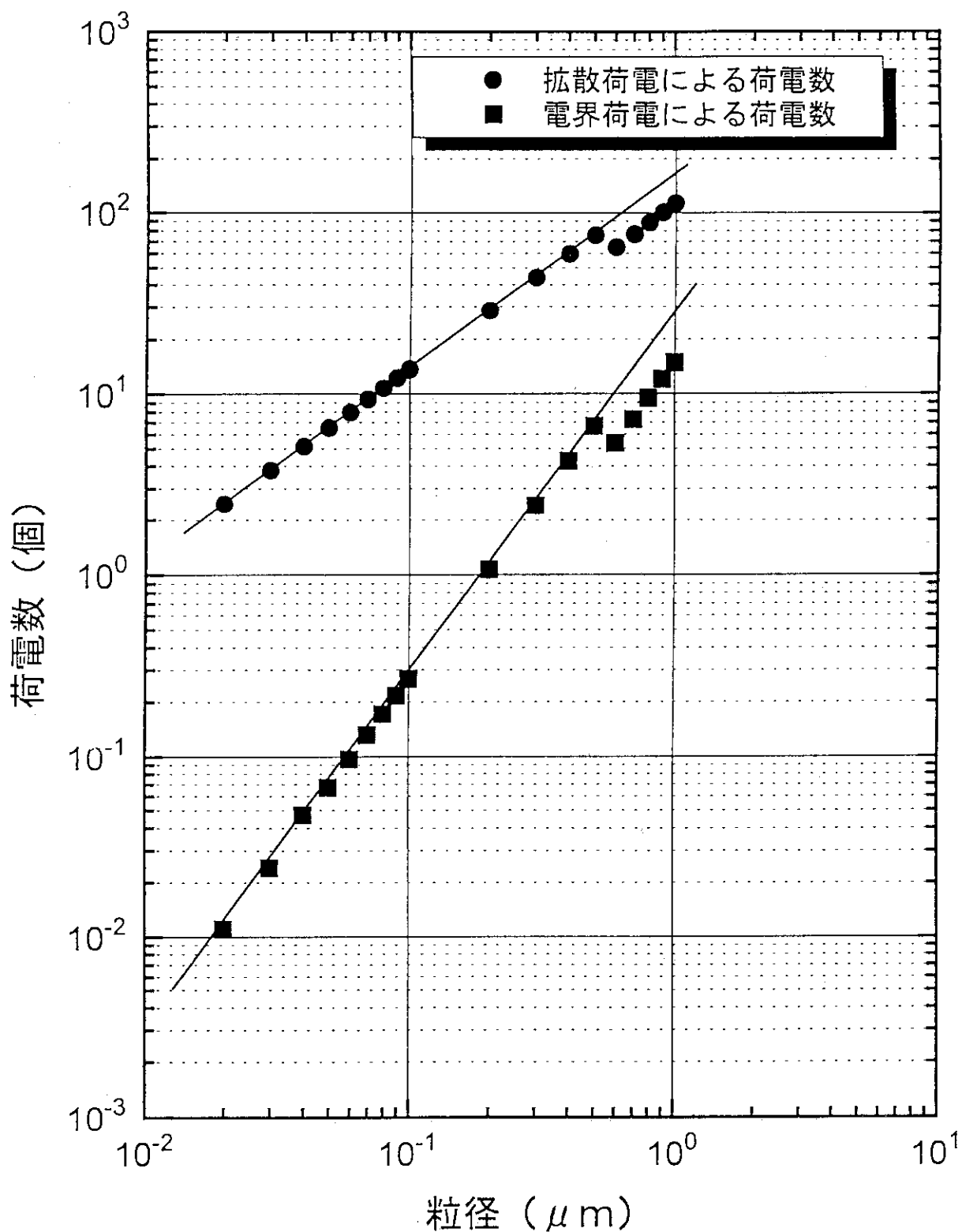


図4.1 エアロゾル粒子に荷電した電荷数 (拡散荷電と電界荷電の比較)

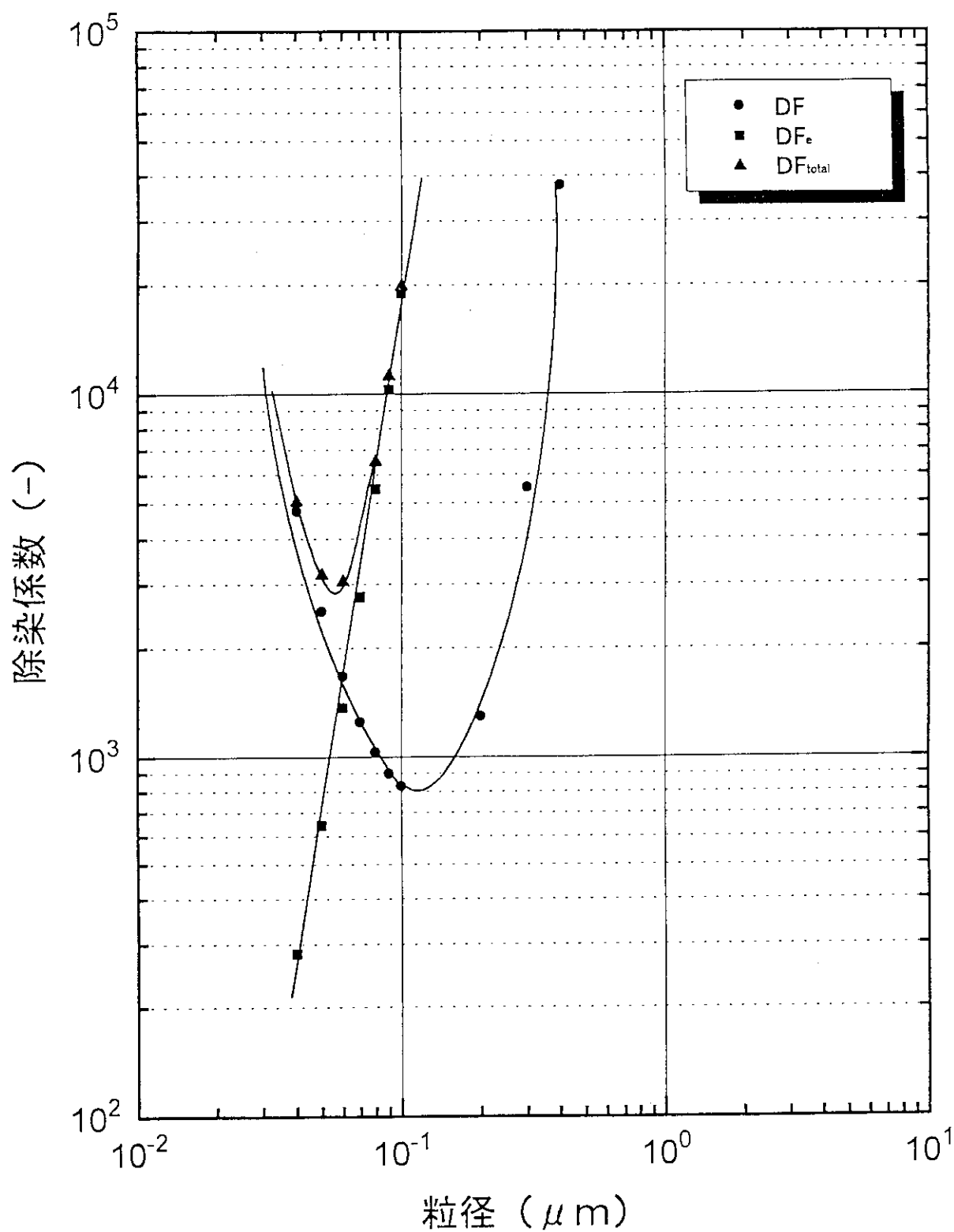


図4.2 HEPA フィルタに対する帯電エアロゾルのDF値 (計算値)  
 フィルタの線速度: 7.1 m/s (定格値)

## 5. 考 察

「放射線によるエアロゾルの電離効果に関する研究」では、エアロゾルに $\gamma$ 線を照射することにより、極めて高い効率でエアロゾルを除去する方式を確立した。雰囲気ガスに $\gamma$ 線を照射すると、ガスは正と負のイオン対に電離するが、このイオン対を2枚の電極により分離し、どちらか一方の単極イオンにエアロゾル粒子を作用させれば、微粒子が荷電されて帯電エアロゾルが発生する。この場合、一方の電極を $\gamma$ 線から遮蔽して、分離した単極イオンを放射線の静電中和から守ることが重要である。

$\gamma$ 線の照射下では、電極を流れる電流は電離イオン対の数に比例した飽和電流である。このような飽和電流が流れている場では、エアロゾル粒子は単極イオンの拡散荷電により帯電することになる。もし、電極に高電圧を印加した場合には、エアロゾルは電界荷電により帯電することになるが、サブミクロン粒子の電界荷電効果は著しく劣っている(図2. 1参照)。電極を流れる飽和電流は数 $\mu$ A程度の極めて小さい電流であるので、コロナ放電などの帯電法と比較して消費電力は無視できるほど小さいことも特徴である。

$\gamma$ 線をエアロゾルに照射すると正と負に帯電したエアロゾル粒子が生成し、帯電した粒子間の凝集効果が促進されて大粒子になり、エアロゾルが除去し易い状態になると期待したが、静電気場におけるエアロゾルの凝集効果は極めて小さいことが分かった。この理由は、帯電エアロゾルが強力な放射線で生成した正負の電離イオン対と衝突して平衡荷電分布をつくり、無帯電粒子と同じ凝集確率になるからである。既に、静電気力場におけるエアロゾル粒子の凝集効果は小さいことが報告されている<sup>(9)</sup>。

$\gamma$ 線の照射下で帯電エアロゾルを有効に発生させるためには、電離したイオン対の数とエアロゾルの滞留時間の相関が重要であり、この関係は(4.2)式と(4.3)式から計算できる。当然であるが、1ヶのエアロゾル粒子に荷電する電荷数が大きいほど帯電効果は有効ではあるが、その帯電量の最大値は限界荷電量で制限されている。放射線の強さを大きくすれば、飽和電流が大きくなって微粒子に荷電する電荷数が増大するので、照射場におけるエアロゾルの滞留時間は短縮できる。従って、 $\gamma$ 線を照射する本方式は帯電装置の大型化とエアロゾルの大量処理の観点から有望である。しかし、本方式は強力な $\gamma$ 線源を使用するので、安定した帯電エアロゾルが大量に製造できる反面、放射線管理や防護など安全対策上の配慮が必要になる。

帯電したエアロゾルは、その影像力効果により物体の表面に沈着し易くなり、また逆の極性を持つ電極上に容易に捕捉され易い性質を持っている。図3. 9には、 $\oplus$ と $\ominus$ に帯電させたエアロゾル粒子の沈着のDF値を示した。実験では、 $\ominus$ の帯電エアロゾルは粒径が $0.4\mu\text{m}$ 以上の領域で $\text{DF}=10^3$ 以上の値になった。この大きな沈着のDF値は、 $\ominus$ の帯電エアロゾルが $\oplus$ の電極上に捕捉された結果であると考えている。また、エアロゾルの粒径が大きい方向でDF値が急激に増大しているが、これは大粒子ほど荷電し得る電荷数が大きくなり、帯電量が大きくなるからである(図4. 1参照)。しかしながら、 $\oplus$ に帯電したエアロゾルのDF値は $\ominus$ の場合ほど、急速な増大はしていない。従っ



て、DOPエアロゾルは⊕に帯電し難い性質を持っているものと考えられる。

図3. 12は、帯電粒子の影像力により向上したHEPAフィルタのDF値が示されている。⊖に帯電させたエアロゾルのDF値は大幅に上昇しているが、⊕に帯電させたエアロゾルのDF値は無帯電エアロゾルのDF値と大差はない。実験では、DOPエアロゾルを⊕に帯電させる実験条件を与えているが、実験の結果は無帯電エアロゾルがHEPAフィルタに流入した場合と同じ結果を示している。

図3. 12の実験値(▲印)と図4. 2の計算値(▲印)を比較すると、帯電粒子の影像力により向上したDF値の曲線は比較的よく似た傾向を持っている。しかしながら、DF値の最小値における粒径の値には大きな食い違いが現れた。この理由については現在のところ明らかではないが、以下の原因に起因するものと考えている。即ち、HEPAフィルタに対する帯電エアロゾルの捕集効果が極めて大きいので、フィルタを透過する粒子数は極めて少なくなり、エアロゾルモニターによる粒子の測定誤差が大きくなった可能性がある。また、図4. 2の計算には(4.15)式で示された高橋らの帯電さえぎり効率を用いたが、この帯電さえぎり効率式の適用に問題がある可能性もある。

図3. 13には、図3. 1のフローシートで示した実験装置を用いて得た帯電エアロゾルのDF値が示されている。この結果から、TRAPOLを設置することにより、HEPAフィルタ単独の場合に比べて、DF値を100～1000倍向上できることを実証した。

エアロゾルを単極に帯電させる方法はコロナ放電法や $\alpha$ 線法が有効であるが、これらの方法は帯電領域が大きく取れないことに原因して装置の大型化が困難である。また、紫外線を光電子放出材に照射して $\beta$ 線を放出させ、エアロゾルを帯電させて除去する方式は帯電装置の大型化に関してかなり有効であると考えている。しかし、火力発電所の煤煙処理など大量のエアロゾルを能率よく除去するためには紫外線による光電子法の採用は能力が不足している。 $\gamma$ 線によるエアロゾルの帯電法は、 $\gamma$ 線の照射領域を大きく取ることができるので、大量のエアロゾル処理が可能である。しかも、この方式は放射線の線質を問わない。現在では、 $\gamma$ 線源は高価ではない。例えば、返還再処理廃棄物のガラス固化体は、1体の固化体あたり22～26PBq(60～70万Ci)の放射能を持っている。従って、ガラス固化体を本方式に有効に利用することも可能である。しかし、本方法は強い放射線を使用することから、放射線管理や安全対策を考慮に入れた設計と設備が必要になる。従って、本方式は大型規模のエアロゾル処理プラントへ適用することが得策であると考えている。

## 6. 結論と今後の展望

本研究では、 $\gamma$ 線による電離効果を利用してサブミクロン領域のエアロゾル粒子を帯電させて、

- ①  $\gamma$ 線がエアロゾルの凝集効果に与える影響
- ②  $\gamma$ 線がエアロゾルの沈着に与える効果
- ③ フィルタの捕集効率の向上
- ④  $\gamma$ 線によるエアロゾルの特異現象の有無

などを調べることを目標に実験を実施した。その結果、 $\gamma$ 線をエアロゾルに照射することにより、高い効率でエアロゾルが電極上に沈着すること、マイナスの帯電粒子がHEPAフィルタにより極めて高い効率で捕集できることを見いだした。しかし、エアロゾル粒子の凝集効果に与える放射線の影響は小さいことが分かった。また、エアロゾルに $\gamma$ 線を照射した場合、エアロゾル粒子の放射線による泳動効果など特異な現象が現れないかと期待したが、本実験では特異現象は現れなかった。

$\gamma$ 線をエアロゾルに照射して捕集する方法は、工業的規模のエアロゾル処理の観点から広い波及効果が期待できる。例えば、原子力の分野では放射性の可燃性廃棄物の焼却炉における煤煙処理に、環境保全の分野では火力発電所の排煙処理に、空気浄化系の分野では半導体製造工業やバイオテクノロジー産業のクリーンルームに応用できると考えている。

一般的に、帯電エアロゾルはコロナ放電で能率よくつくられるが、放電の領域が小さいことに起因して帯電装置の大型化が困難である。また、 $\alpha$ 線法や紫外線による光電子法もエアロゾルの大量処理の観点から能力が不足している。さらに、帯電フィルタの採用は帯電繊維の直径が太いので、エアロゾルがフィルタ上に大量に堆積すると帯電繊維の荷電が中和され、著しいエアロゾルの捕集効率の低下が問題になっている。

この報告書では、 $\gamma$ 線による除去方法に関する実験、放射線によるエアロゾルの荷電現象と帯電エアロゾルのフィルタ捕集に関する理論的背景、及び実験結果と計算結果の比較について記載した。 $\gamma$ 線照射法によるエアロゾルの捕集方法は、大量のエアロゾルを有効に処理できる能力を持っているので、今後は大型実験装置を用いて本方式の工業化の可能性を模索したい。

## 文 献

- (1) W. C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley and sons. Inc., (1982).  
早川一也訳、「エアロゾルテクノロジー」、井上書院、(1985)。
- (2) 江見準、「エアフィルタの集塵性能と静電気効果」、静電気学会誌、12, (5), 330-339 (1988).
- (3) 高橋、金川、「放射線静電荷電装置によるエアロゾル粒子の単極拡散荷電」、化学工学論文集 第9巻、第5号、575-577 (1983)。
- (4) 高橋、金川、「繊維層フィルタによる帯電エアロゾル粒子の捕集」、化学工学論文集、第4巻、第5号、446-451、(1978)。
- (5) 吉岡、江見、服部、田森、「濾過集塵における静電気力の影響」、化学工学、第32巻、第8号、815-820、(1968)。
- (6) T. Fujii, H. Suzuki, K. Sakamoto, "Super Cleaning of Space by Photoelectric Charging and Collecting Unit", エアロゾル研究、Vol. 8, No. 1, 54-57 (1993).  
藤井、鈴木、鹿島、坂本、「UV/光電子法による密閉空間の超清浄化」、  
第11回エアロゾル科学・技術研究討論会、Aug., 18~20, 1994.
- (7) 尾崎、金川、「高性能エアフィルタ苛酷時健全性試験 (I)、DOPエアロゾルの捕集性能」、日本原子力学会誌、Vol. 27, No. 7, (1985)。
- (8) 江見準、「サブミクロン粒子の分離」、粉碎、No. 28, 93-103, (1984)。
- (9) 足立、「エアロゾルの荷電特性と静電気凝集」、静電気学会誌、Vol. 12, No. 5, 318-323, (1988).

## 付 録

## (1) 静電単位の換算

静電単位 (esu) では、荷電量の単位を statCoulomb (stC) で表す。即ち、1 stC とは、1 cm 離れている 2 つの電荷に働く斥力が 1 dyne である場合の荷電量である。1 stV は、1 stC の電荷が 2 点間を動く間に 1 erg (dyn cm) の仕事をするときの電位差である。

$$\begin{array}{l} 1 \text{ st A} = 1 \text{ st C} / \text{s} \quad 1 \text{ st V} = \text{dyn cm} / \text{stC} \\ \text{dyn} = \text{stC}^2 / \text{cm}^2 \quad \text{st V} = \text{st C} / \text{cm} \end{array}$$

SI 単位では、荷電量単位は Coulomb (C) で表す。1 C とは、1 A の電流によって 1 秒間に輸送される荷電量である。1 V は、1 A の電流を流した場合 1 W の力を消費するのに必要な電位差である。

## 静電単位と SI 単位の換算

数量	静電単位	SI 単位
荷電量	1 st C	$3.33 \times 10^{-10}$ C
電流	1 st A	$3.33 \times 10^{-10}$ A
電位差	1 st V	300 V
電気素量	$4.8 \times 10^{-10}$ stC	$1.6 \times 10^{-19}$ C

荷電の解析式には、cgs 静電単位を用いた経験式或いは半理論式が使われている場合がある。このような場合には、SI 単位を使用すると間違える場合があるので注意が必要である。

## (2) 電場 (Electric field)

電場の強さ (Electric field strength) は、単位電荷 (q) 当たりに形成される力 ( $F_E$ ) で定義され、電界強度 (E) と呼ばれる。

$$E = F_E / q = F_E / ne, \quad F_E = neE \quad (q = ne)$$

ここで、 $F_E$  はエアロゾル粒子に働く静電気力、n は荷電の数、e は電子 1 個の荷電量 ( $4.8 \times 10^{-10}$  stC) である。

## (3) 電気移動度

エアロゾル粒子に働く静電気力が Stokes の抗力に等しいとすれば、 $F_E = F_D$  となる。即ち、

$$neE = \frac{3\pi\eta V_E d_p}{C_c}, \quad V_E = \frac{neEC_c}{3\pi\eta d_p} = neBE = Z_E E$$

ここで、 $V_E$  は静電気力によるエアロゾル粒子の移動速度、 $Z_E$  は粒子の電気移動度 (Electric mobility)、 $B$  は粒子の力学的移動度 (Mobility =  $C_c / 3\pi\eta d_p$ ) である。なお、 $Z_E$  の単位は  $[\text{cm/s}/\text{stV/cm}] = [\text{cm}^2/\text{stV}\cdot\text{s}]$  である。