

クリーンルームにおける  
イオナイザーを用いた静電気対策技術に関する研究

2014年6月

博士（工学）

佐藤 朋且

豊橋技術科学大学

## 要 旨

近年の半導体や液晶製造などの電子デバイス産業では、コンタミネーションコントロールが重要な基盤技術となっており、クリーンルームに代表されるクリーン化の技術が大きな役割を担っている。

これらのクリーンルームでは、微粒子やガスなどの清浄度レベルだけでなく、温湿度や気流性状、静電気や振動といったあらゆる要素を厳しく管理しなければならない。特に静電気は、電子デバイス製造環境の相対湿度が静電気の発生し易い40%~45%程度であること、デバイス自体を含め多種の絶縁物が接触・摩擦・剥離を繰り返して製造されることから、常に広範囲で発生している。さらに静電気は、静電気力による浮遊微粒子の付着（ESA）や静電気放電（ESD）によるデバイス破壊など、製品の歩留まりに大きく影響する生産障害を引き起こす。静電気力が微粒子沈着を助長する現象や、近年のデバイスの高集積度化に伴う静電気耐性の低下については多数の報告があり、デバイスへの静電気の影響は深刻化している。そのため、クリーンルームにおける静電気対策は、コンタミネーションコントロールの観点からもきわめて重要なファクターであり、電子デバイス産業にとって必要不可欠な技術であるといえる。

クリーンルームにおける静電気対策は、接地や加湿による静電荷の緩和と、除電装置（イオナイザー）による静電荷の中和（除電）の2つの方法に大別されるが、接地によるデバイス汚染や水分の影響などの懸念から、電子デバイス製造では後者が有効である。なかでも、取り扱いの容易さから電圧印加型のコロナ放電式イオナイザーが広く用いられており、クリーンルーム用のイオナイザーとして今日主流である。しかし、従来のコロナ放電式イオナイザーは、放電電極への微粒子の付着（析出）と、電極の摩耗による発塵が指摘されており、クリーンルーム環境中では重大な問題となっていた。一方で、より高清浄度を要求するプロセスなどで、無発塵の除電が可能な軟X線式イオナイザーも広まりつつあるが、人体被曝の防護対策が必須な点や、狭小部の除電が困難な点など、取り扱い上の難点があった。

本研究は、コンタミネーションコントロールの観点から、クリーンルームにおける静電気対策として、従来の問題点を解決したクリーンルーム用イオナイザーを開発することを目的としている。そして、イオナイザーのクリーンルームへの適用のために考案した手法について、原理の妥当性の検討や性能評価を行い、その結果、以下について実用化が可能であることが示唆された。

### (1) クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）

電極を加熱することで電極先端に熱泳動力を発生させ、電極への微粒子の付着・析出を抑制するとともに、放電電極の構成材質に耐腐食性の金属を用いることで電極の摩耗を低減したコロナ放電式イオナイザー。

### (2) クリーンルーム用無発塵イオナイザー（軟X線式）

無発塵でのイオン生成が可能な軟X線をイオン化源に使い、イオナイザー自身に組み込んだ軟X線遮蔽構造により設置場所の防護対策を不要とした、安全な軟X線式イオナイザー。また、狭小部の除電を目的とし、軟X線で生成したイオンを水蒸気の凝縮によって粗大化し、チューブ搬送して除電する軟X線式イオナイザー。

## Abstract

In recent years, contamination control has become a key fundamental technology in the field of manufacturing electronic devices, such as semiconductors and liquid crystal displays. Cleanliness control technologies, as typified by clean rooms, play an important role in manufacturing of such devices.

Clean rooms require strict control of not only the cleanliness levels of particles and gases but also the temperature, humidity, air current properties, static electricity, vibration and many other elements. Among them, static electricity is always widely generated because electronic devices are manufactured in an environment where the relative humidity is 40 to 45% (a level of humidity in which static electricity is easily generated) and devices and various other kinds of insulators are manufactured through repeated contact, friction and stripping processes. What is worse, static electricity gives rise to various obstacles in production that significantly affect production yield—such as electrostatic attraction (ESA)—in which airborne particles are deposited by electrostatic force, and device breakdown caused by electrostatic discharge (ESD). There have been many reports: 1) describing phenomena in which static electricity accelerates the deposition of particles and a decrease in static electricity resistance of recent highly-integrated devices, and 2) indicating that static electricity has been producing more serious effects on devices. In view of this, how to prevent static electricity in clean rooms is a very important factor for contamination control and is an essential technology for the electronic device industry.

There are two common measures against static electricity in clean rooms: 1) static charge relaxation by grounding and humidification and 2) static charge neutralization (electrostatic elimination) using static eliminators (ionizers). The latter is more effective for use in producing electronic devices because the former raises concerns about contamination of devices due to grounding and the influence of moisture. Among others, corona discharge ionizers of voltage application type are widely used due to their ease of use, and they are the most commonly used ionizers for clean rooms. However, it's been pointed out that conventional corona discharge ionizers cause particles to be deposited onto a

discharging electrode and generate dust by abrasion of the electrode, thereby resulting in serious problems in clean room environments. Meanwhile, soft X-ray type ionizers that can eliminate static electricity without generating dust have also been increasingly used in processes that require a higher degree of cleanliness. However, there are some disadvantages in using ionizers of this type, such as the need to take measures to protect the human body from exposure to X-rays and the difficulty in eliminating static electricity in a narrow space.

The intent of this study is to develop clean-room ionizers that can solve conventional problems of static electricity for contamination control in clean rooms. The authors examined the validity of the principles of techniques developed for applying the ionizers to clean rooms and evaluated their performance. The results indicated the possibility of the practical application of the following types of ionizers:

(1) Low-particle-emission ionizer for clean rooms (corona discharge method)

A corona discharge ionizer that prevents the deposition of particles onto the electrode by using the thermophoretic force generated by heating the electrode and reduces abrasion of the electrode by using corrosion-resistant metal as a constituent material of the discharging electrode.

(2) Non-particle-emission ionizer for clean rooms (soft X-ray method)

A safe soft X-ray type ionizer that uses soft X-rays as an ionization source to generate ions without emitting particles and has a built-in soft X-ray shield structure to eliminate the need for taking protective measures in the installation location, and a soft X-ray type ionizer in which ions are generated by soft X-rays, coarsened by the condensation of water vapor and transported through a tube to eliminate electricity in a narrow area.



## 目 次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	3
1.3	本論文の構成	5
第2章	帯電体の除電理論とクリーンルームにおける静電気対策の問題点	9
2.1	帯電体の除電方法と除電装置（イオナイザー）	9
2.1.1	接地による除電	9
2.1.2	除電装置（イオナイザー）による除電	13
2.1.3	除電装置（イオナイザー）の種類	15
2.1.4	除電性能の評価方法	17
2.2	クリーンルームにおける静電気対策	21
2.2.1	クリーンルームにおける静電気障害	21
2.2.2	クリーンルームにおける静電気対策と問題点	29
2.2.3	コロナ放電式イオナイザーの問題点（電極からの発塵現象）	30
2.2.4	軟X線イオナイザーの問題点（使用上の注意点）	35
2.3	まとめ	39
第3章	クリーンルーム用低発塵イオナイザーの開発（コロナ放電式）	43
3.1	開発の背景と目的	43
3.2	電極加熱による熱泳動を用いた微粒子付着の抑制方法	46
3.2.1	微粒子付着の抑制に必要な温度勾配の概算	46
3.2.2	微粒子付着抑制効果の確認実験	52
3.2.3	様々な抵抗体の抵抗加熱による自己発熱型電極の発熱実験	57
3.2.4	SiC を組み込んだ自己発熱型電極の発熱特性	63
3.2.5	自己発熱型電極イオナイザーの除電性能と異物付着抑制効果	77
3.3	耐摩耗性金属による放電電極の摩耗抑制	84
3.3.1	耐摩耗性電極材料の検討	84
3.3.2	耐摩耗性電極の摩耗量の評価試験	86
3.4	まとめ	91

第4章	クリーンルーム用無発塵イオナイザーの開発（軟X線式）	94
4.1	開発の背景と目的	94
4.2	遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザー	95
4.2.1	軟X線の遮蔽構造の検討	97
4.2.2	除電性能に対する諸因子の影響	106
4.3	粗大化イオンのチューブ搬送型軟X線イオナイザー	119
4.3.1	水蒸気の凝縮を利用したイオンの粗大化	124
4.3.2	除電性能に対する諸因子の影響	126
4.4	まとめ	139
第5章	結論	142
5.1	本研究のまとめ	142
5.1.1	クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）	142
5.1.2	クリーンルーム用無発塵イオナイザーの開発（軟X線式）	144
5.2	今後の課題	146
5.2.1	クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）	146
5.2.2	クリーンルーム用無発塵イオナイザーの開発（軟X線式）	147

謝辞

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

近年の半導体や液晶製造をはじめとする先端電子デバイス産業では、精密化や微細化に加え、高品質、高信頼性が要求されており、これらの達成のためにコンタミネーションコントロールが重要な基盤技術となっている。その中でもクリーンルームに代表されるクリーン化技術の役割は大きく<sup>1)</sup>、製品の歩留まりに直接影響する浮遊微粒子や、最近ではガス状の化学物質についても高い清浄度レベルの管理が必要となっている。特に、半導体製造においてウェハやフォトマスクに微粒子が付着すると、フォトリソグラフィプロセスではパターン欠陥の発生、拡散プロセスでは半導体の純度低下など、デバイスの不良の原因となる<sup>2)</sup>。また、半導体製造のクリーンルームで対象となる微粒子の粒径は、ウェハ上に作り込む線幅の1/2程度言われており<sup>1)</sup>、ITRSロードマップのゲート長スケーリングトレンド（予測）によれば、2014年におけるCMOSゲート長は20nm前後まで微細化が進むため<sup>3)</sup>、今後、制御対象となる微粒子径についてもますます厳しい管理が求められることが予想される。

これらのクリーンルームは、微粒子やガスなどの清浄度レベルだけでなく、温湿度や気流性状、静電気や振動といったあらゆる要素についても管理しなければならない。特に静電気は、電子デバイス製造クリーンルームの相対湿度が一般に静電気が発生し易い40%~45%程度であること<sup>4)</sup>、またデバイスの製造プロセスでは、デバイスそのものを含めた多種の絶縁物が接触・摩擦・剥離を繰り返すことから、常に広範囲で発生している<sup>5)</sup>。さらに静電気は、静電気力による浮遊微粒子の付着（ESA：Electrostatic Attraction）や、静電気放電（ESD：Electrostatic Discharge）によるデバイス破壊と特性劣化、およびESDで発生した電磁干渉（EMI：Electrostatic Interference）による生産装置の誤動作など、製品の歩留まりに大きく影響する生産障害を引き起こす。静電気力による微粒子付着に関しては、これまで微粒子の表面沈着現象に関する研究が盛んに行われており、静電気力によって微粒子沈着が助長されることが明らかになっている<sup>6-8)</sup>。ESDについても、近年のデバイスの高集積度化に伴う静電気耐性の低下に関する報告が多数あり<sup>9-12)</sup>、デバイスへの静電気の影響は深刻化

している。そのため、クリーンルームにおける静電気対策は、コンタミネーションコントロールの観点からもきわめて重要なファクターであり、電子デバイス産業にとって必要不可欠な技術であるといえる。

クリーンルームにおける静電気対策は、接地や加湿といった導電化による静電荷の漏洩・緩和と、除電装置（イオナイザー）による空気イオンを用いた静電荷の中和（除電）の2つの方法に大別されるが、接地によるデバイス汚染や水分の影響などの懸念<sup>13,14)</sup>から、電子デバイス製造では後者のイオナイザーによる除電が有効である。なかでも、取り扱いの容易さから電圧印加型のコロナ放電式イオナイザーが広く用いられており、クリーンルーム用のイオナイザーとして今日主流である<sup>15)</sup>。しかしながら従来のコロナ放電式イオナイザーは、放電電極への微粒子の付着・再飛散と、電極の摩耗によって発塵することが指摘されており、クリーンルーム環境中では重大な問題となっていた<sup>16,17)</sup>。また一方で、より高潔度のプロセスでは完全無発塵での除電の要求もあり、イオン生成の際に発塵が無い、低エネルギーのX線（以下軟X線）をイオン化源とする軟X線式イオナイザーが用いられるようになってきた<sup>18-20)</sup>。しかし、軟X線式イオナイザーの使用にあたっては、人体の被曝防止のため、法規に基づいた設置エリアの区画やインターロックなどの防護対策が必須となる<sup>21-23)</sup>。また、生産装置内の狭小部では軟X線イオナイザーの設置スペースが確保できない問題や、障害物により軟X線が除電対象に直接届かない部位の除電効果が得られないなど、取り扱い上の難点があった<sup>18)</sup>。

上記のように、クリーンルームにおける静電気対策としてイオナイザーを用いる場合には、種々の課題があり、幾つかの対策も提案されているが、コスト面を含め完全な解決に至っていないのが現状である。

## 1. 2 研究の目的

本研究は、コンタミネーションコントロールの観点から、クリーンルームにおける静電気対策として、従来のイオナイザーの持つ課題を解決したクリーンルーム用イオナイザーを開発することを目的としている。クリーンルーム用イオナイザーとしては、コロナ放電式と軟 X 線式の代表的な 2 方式のイオナイザーについて取り上げ、コロナ放電式イオナイザーは電極からの発塵について、無発塵の軟 X 線式イオナイザーについては人体の被曝防止や除電性能面で対策を講じることで、クリーンルームへの適用を図る。本論文では、それぞれのイオナイザーをクリーンルームに適用するために考案した幾つかの手法について、原理の妥当性の検討や性能評価を行い、①クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）および②クリーンルーム用無発塵イオナイザー（軟 X 線式）として提案している。以下に、概要と本論文で述べる内容を示す。

### ①クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）

従来のコロナ放電式イオナイザーは、イオン生成用の放電電極から発塵しており、クリーンルーム環境では問題となっていた。発塵の原因は、電極への微粒子の析出・飛散と、電極の摩耗による金属飛散であることが明らかとなっており<sup>17-18)</sup>、電極周囲を高純度窒素ガスなどのクリーンエアでパージする方法や<sup>25-26)</sup>、耐摩耗性の電極材質を用いるなどの対策が行われているが<sup>25-27)</sup>、パージエアのコストや電極摩耗の更なる低減の要求など、課題が残されていた。そこで、電極を加熱することで電極先端に熱泳動力を発生させ、電極への微粒子付着・析出を抑制するとともに、耐摩耗性を向上させた材質の放電電極を用いたコロナ放電式イオナイザーを考案した。本論文では、電極への微粒子付着を抑制する原理について検討し、さらにその効果を評価した結果について述べる。また、考案した新しい耐摩耗性電極の評価結果について述べる。

### ②クリーンルーム用無発塵イオナイザー（軟 X 線式）

完全無発塵で除電を行う場合に、低エネルギー X 線（以下軟 X 線）をイオン化源とする軟 X 線式イオナイザーが用いられている<sup>19-21)</sup>。しかし、軟 X 線の使用にあたっては、人体被曝防止のため、法規に基づいた防護対策

が必須であり、設置エリアの区画やインターロックによる自動停止などの安全機構を備えなければならない<sup>22-24)</sup>。また、生産装置内部などの狭小部においては、イオナイザーの設置スペースが確保できないなど、取り扱い上の難点があった。そこで、イオナイザー本体に軟 X 線の遮蔽構造を組み込み、イオンのみを除電エリアに供給する、無発塵で安全な遮蔽構造付き軟 X 線イオナイザーを考案した。また、狭小部の除電を目的とし、イオンをチューブで除電エリアに搬送する方式も考案した。本論文では、軟 X 線の遮蔽構造やイオンのチューブ搬送の原理について検討し、これらイオナイザーの除電性能の向上のために、諸因子の除電性能に与える影響について調査した結果について述べる。

### 1. 3 本論文の構成

本論文は、「クリーンルームにおけるイオナイザーを用いた静電気対策技術に関する研究」と題し、全5章より構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景と研究の目的を述べており、研究の意義と位置づけを明らかにするとともに、研究の全体構成を示している。

第2章「帯電体の除電理論とクリーンルームにおける静電気対策の問題点」では、前半で帯電体の除電方法とその理論、および除電装置（イオナイザー）の種類と評価方法について概要を述べている。次に後半では、クリーンルームにおける静電気対策と静電気障害、および静電気対策の問題点について述べ、電子デバイス産業において静電気対策が必要不可欠で、コンタミネーションコントロールの観点からも重要なファクターであることを述べている。また、コロナ放電式イオナイザーの電極からの発塵メカニズムについて既往の研究を紹介するとともに、軟X線式イオナイザーにおける使用上の問題点を述べている。

第3章「クリーンルーム用低発塵イオナイザーの開発（コロナ放電式）」では、前半でコロナ放電式イオナイザーの放電電極への微粒子付着に起因する発塵に対して、現状行われている対策の課題を述べた上で、新たな対策方法として、放電電極を加熱することにより発生する熱泳動力を用いて微粒子の付着抑制を試みた、電極加熱方式のイオナイザーを提案している。また、実用的な電極の加熱方法について、抵抗体のジュール加熱を用いた自己発熱型電極を提案し、発熱実験などを実施した結果から電極の発熱特性について述べている。さらに、自己発熱型電極を用いた電極加熱方式のイオナイザーについて、除電性能、微粒子付着防止効果の評価結果について述べている。次に後半では、イオナイザーの放電電極の摩耗に起因する発塵に対して、現状の耐摩耗性電極を改善した新しい耐摩耗性電極について述べ、電極からの金属飛散量の評価と長期の耐久試験を行った結果について述べている。

第4章「クリーンルーム用無発塵イオナイザーの開発（軟X線式）」では、まず、無発塵のイオナイザーとして、軟X線をイオン化源に用い、軟X線の遮蔽構造をイオナイザー本体に組み込んだ、軟X線遮蔽機構付きのイオナイザーについて概説する。次に、その遮蔽構造について検討した結果を述べ、遮蔽構造の設計手法について述べている。また、このイオナイザーの除電性能の向上のために、諸因子の除電性能に与える影響について調査した結果を述べている。さらに後半では、軟X線イオナイザーのアプリケーションの一つで、狭小部の除電を目的として、イオンをチューブで除電エリアに搬送する方式を提案している。軟X線で生成したイオンをチューブで搬送する際の、再結合によるイオン消耗の問題点について指摘し、イオンを粗大化することで搬送中のイオン消耗を改善した方式について詳細に説明している。また、同じく除電性能の向上のために、諸因子の除電性能に与える影響について調査した結果を述べている。

第5章「結論」では、各章で得られた結果を要約し、本論文の成果を明らかにするとともに、今後の課題について述べている。



## 序章 参考および引用文献

- 1) 空気清浄協会編：クリーンルーム環境の計画と設計第3版，オーム社（2013）pp. 1-5
- 2) 岡野一雄：ULSIの静電気障害と障害予知のための測定技術，静電気障害防止技術シンポジウム予稿集（2006）p. 2
- 3) ITRS2011Edition Executive Summary,
- 4) 樋口弘志，前田宗雄，山内健次，高橋伸夫：半導体製造工程上の静電気力による付着浮遊微粒子の影響，静電気学会誌，14巻4号（1990）p. 307
- 5) 稲葉仁：LCD製造における静電気対策，クリーンテクノロジー，14巻4号（2004）p. 26
- 6) 樋口弘志，前田宗雄，山内健次，高橋伸夫：半導体製造工程上の静電気力による付着浮遊微粒子の影響，静電気学会誌，14巻4号（1990）p. 307
- 7) 藤井修二，謝国平，金光映：整流型クリーンルーム内における粒子沈着モデルの提案，エアロゾル化学・技術研究討論会論文集（1988）p. 28
- 8) 阪田総一郎，池鯉鮒悟，井上正憲，吉田隆紀，岡田孝夫：クリーンルーム内の静電気による粒子沈着，エアロゾル化学・技術研究討論会論文集（1988）p. 36
- 9) 二澤正行：図解静電気管理入門，工業調査会（2004）pp. 67-75
- 10) 大津孝佳，小林優作，堂山英之，今井省吾，谷辻和幸：ハードディスクドライブのグラウンドからの静電気放電の影響，第22回EOS/ESD/EMCシンポジウム予稿集（2012）p. 131
- 11) 大津孝佳，堂山英之：ESDガン印加時の保護素子の効果と電子デバイスへの影響，第23回EOS/ESD/EMCシンポジウム予稿集（2013）p. 74
- 12) 大津孝佳，堂山英之，鷺坂耕一，白山太一：カーボンナノチューブを用いた導電性複合樹脂の放電特性と放射電磁波，第23回EOS/ESD/EMCシンポジウム予稿集（2013）p. 103
- 13) 沼口敏一：電気・電子工業における静電気対策製品，静電気学会誌，20巻5号（1996）p. 287

- 14) 高塚威, 神戸正純: 分子シミュレーションによるシリコンウェハ表面への各種分子状汚染物質の平衡吸着量, 空気調和・衛生工学会論文集 107 (2006) p.29
- 15) 高橋忠: 静電気除去装置の現状と課題, 空気清浄, 27 巻 6 号 (1990) p. 22
- 16) B. Y. H. Liu, D. Y. H. Pui, W. O. Kinstly, W. G. Fisher: Characterization of Electronic Ionizers for Clean Rooms, presented at the 31<sup>st</sup> Annual Technical Meeting of IES (April/May, 1985)
- 17) 並木則和: クリーンルーム環境におけるガス-粒子変換-イオナイザ電極における粒子生成に着目して-, クリーンテクノロジー, 4 巻 7 号 (1994) p. 67
- 18) 鈴木政典, 和泉貴晴, 鋒治幸, 石川昌義: 微弱 X 線イオナイザの安全な使用方法, クリーンテクノロジー, 10 巻 6 号 (2000) p. 18
- 19) 池鯉鮒悟: 光照射方式イオナイザ「IRISYS シリーズ」, クリーンテクノロジー, 14 巻 7 号 (2004) p. 33
- 20) 稲葉仁: プロセスチャンバ内における除電技術, クリーンテクノロジー, 3 巻 11 号 (1993) p. 45
- 21) 浜松ホトニクス: フォトイオナイザ L9490 取扱説明書 Ver. 5
- 22) 稲葉仁: クリーンルームにおける制電エンジニアリング 生産現場での顧客への貢献, クリーンテクノロジー, 19 巻 4 号 (2009) p. 7
- 23) 稲葉仁, 大見忠弘, 吉田隆紀, 岡田孝夫: 極微弱軟 X 線照射除電技術, 静電気学会誌, 18 巻 1 号 (1994) p. 34

## 第2章 帯電体の除電理論とクリーンルームにおける静電気対策の問題点

### 2.1 帯電体の除電方法と除電装置（イオナイザー）

帯電体の除電方法は、(1) 導電化による静電荷の漏洩・緩和（接地による除電）と、(2) 除電装置（イオナイザー）で発生した空気イオンによる静電荷の中和（除電装置による除電）、の2つの方法に大別される<sup>1)</sup>。以降に、それぞれの除電方法について述べる。

#### 2.1.1 接地による除電

主に、帯電体が導電性（導体）の場合に、大地（アース）と電氣的に接続し、静電荷を漏洩・緩和させる方法である<sup>2)</sup>。図2.1aに示すように接地との静電容量  $C$  の帯電体を抵抗  $R$  で接地する場合、図2.2aに示すように、帯電体を等価的に抵抗  $R$ 、静電容量  $C$  の並列回路で表すことができる<sup>3-5)</sup>。この時帯電量は図2.2bに示すように、時間とともに指数関数的に減少し、新たな電荷の発生がなければ最終的に帯電電荷は無くなり、除電できる。ここで、帯電発生時の電荷量を  $Q_0$  とすると、 $t$  秒後の帯電体の電荷量  $Q$  は、式(2.1)で表され、電荷緩和時定数（または電荷緩和時間） $\tau$  は、静電容量  $C$  と漏洩抵抗  $R$  の積（式(2.2)）になる。また  $\tau$  は、電荷が発生時の  $1/e$ （約37%）となる時間を示している。

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.1)$$

$$\tau = CR \quad (2.2)$$

- $Q_0$  :  $t$  秒後の帯電電荷量 [C]
- $Q$  : 発生時の帯電電荷量 [C]
- $\tau$  : 電荷緩和時定数 [s]
- $C$  : 静電容量 [F]
- $R$  : 漏洩抵抗 [ $\Omega$ ]

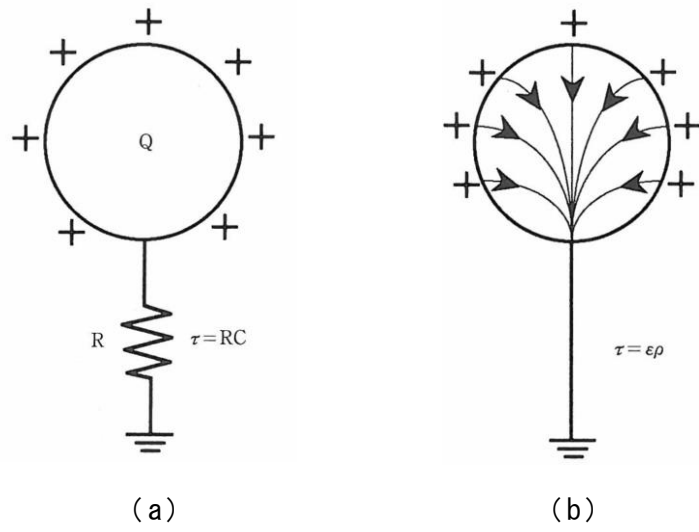


図 2.1 接地による除電

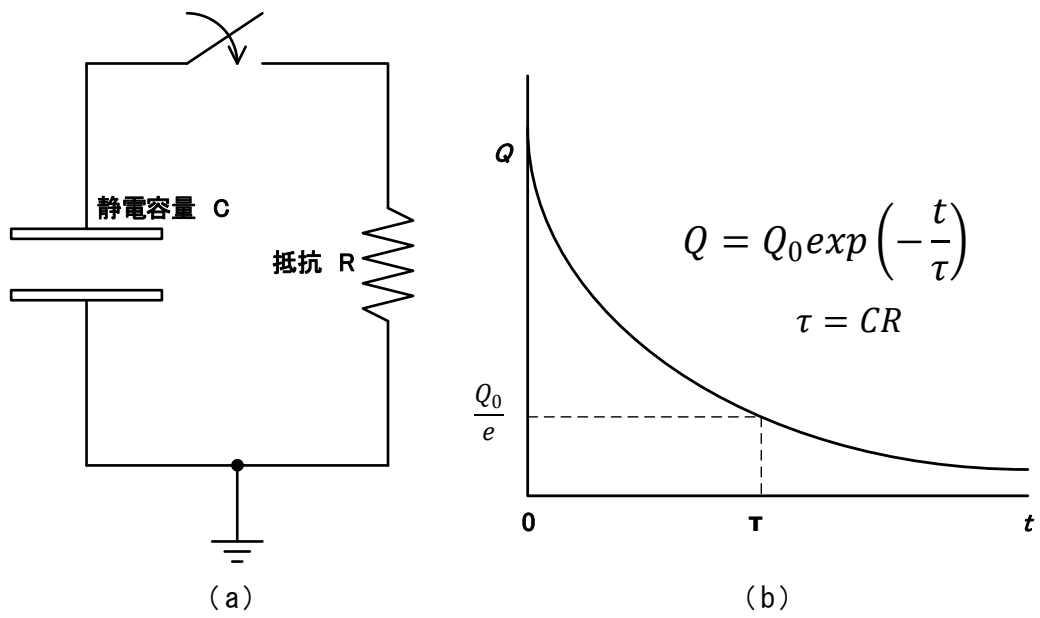


図 2.2 接地による除電

次に、帯電体が絶縁体（誘電体）の場合は、図 2.1b に示すように誘電率  $\varepsilon$ 、体積抵抗率  $\rho$  の帯電体の一点を接地すると、電荷が帯電体表面を漏洩しないとき、電荷は物体内の電気力線に沿って移動し、除電される。このとき  $\tau$  は、誘電率  $\varepsilon$  と体積抵抗率  $\rho$  の積（式 (2.3)）で表される。 $\tau$  は、物体の誘電率（静電容量）と抵抗率（漏洩抵抗）に依存し、それぞれが大きいほど緩和時間は長くなる。導体のように、帯電電圧に依存する電気伝導が無い（導電率が一定）物質の場合は式 (2.1) に従うが、多くの絶縁体（低導電率）の場合は、これに従わないこともある<sup>5)</sup>。

$$\tau = \varepsilon\rho (= \varepsilon/\kappa) \quad (2.3)$$

- $\varepsilon$  : 誘電率 [F/m]
- $\rho$  : 体積抵抗率 [ $\Omega \cdot m$ ]
- $\kappa$  : 導電率 [S/m]

また、絶縁体（不導体）に対しては、加湿による導電化も広義の意味で接地による除電方法の一つとして挙げられる。加湿によって絶縁体表面での吸湿量が増加し、その表面の電気伝導率が高まることで静電荷が大気中（アース）に漏洩し、その結果帯電電位が低くなる<sup>6)</sup>。表 2.1<sup>6)</sup> に示すように、相対湿度を上げることで帯電電位を低く抑えられることがわかる。環境全体に効果を波及させることができ有効な手段であるが、湿度を嫌う製品や環境への適用には注意が必要である<sup>7)</sup>。

表 2.1 各種動作により発生する帯電電圧<sup>6)</sup>

発 生 源	発生電圧(V)		
	相対湿度	相対湿度	相対湿度
	10%	40%	55%
人がカーペットの上を歩く	35,000	15,000	7,500
人がビニール床の上を歩く	12,000	5,000	3,000
ベンチでの作業	6,000	800	400
プラスチックチューブからセラミックDIPを取り出す	2,000	700	400
ビニールのトレイからセラミックDIPを取り出す	11,500	4,000	2,000
ポリエチレンフォームからセラミックDIPを取り出す	14,500	5,000	3,500
プリント配線基板を包んでいる包装材(バブルパック)を取り去る	26,000	20,000	7,000

## 2. 1. 2 除電装置（イオナイザー）による除電

除電装置（イオナイザー）は様々な方式によって空気イオンを発生し、帯電物体と逆極性の空気イオンを供給して電氣的に中性にする機能を有するものである。図 2.3<sup>3)</sup> に示すコロナ放電式イオナイザーによる除電では、イオナイザーの針電極先端部でプラズマが形成され、帯電物体とイオナイザーとの間の電気力線に沿って帯電物体と逆極性のイオンが引き出され、物体表面の電荷を中和する。これが、イオナイザーによる除電の原理である。このとき、図 2.4<sup>3)</sup> に示すように物体表面に正負の電荷が近接して存在する場合は、イオナイザーからの電界が打ち消され、近接した正負の電荷同士で閉じた電気力線を形成してしまい、逆極性の空気イオンを引き出せず、除電しにくくなる。また、コロナ放電式イオナイザーのコロナ放電部では、発塵やオゾンの発生などの問題もある。このコロナ放電式イオナイザーからの発塵については、以降で詳述する。また、オゾンはあまり高濃度になると身体に有害となる<sup>7)</sup>。

除電に利用される空気イオンは、小イオンと大イオンのうち主に小イオンに属し、その直径は 1nm 程度である。また、負イオンは、正イオンより平均して 2~3 割小さい<sup>8)</sup>。空気イオンの形態は、正イオンは主に水クラスタイオン  $H^+(H_2O)_n$  からなり、負イオンは酸素イオン  $O_2^-$  が主成分で、大気中の組成やイオンの発生方法によっても異なるが、二酸化炭素イオン  $CO_2^-$  や二酸化窒素イオン  $NO_2^-$  など各種からなる。

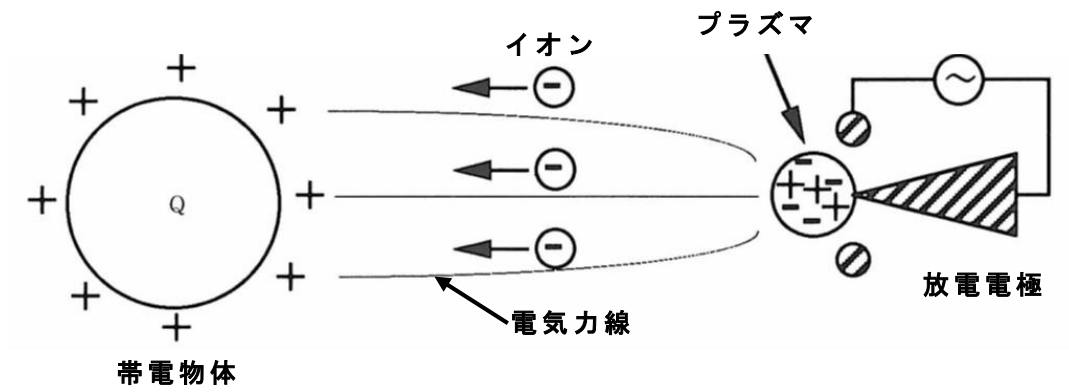


図 2.3 コロナ放電式イオナイザーによる除電<sup>3)</sup>

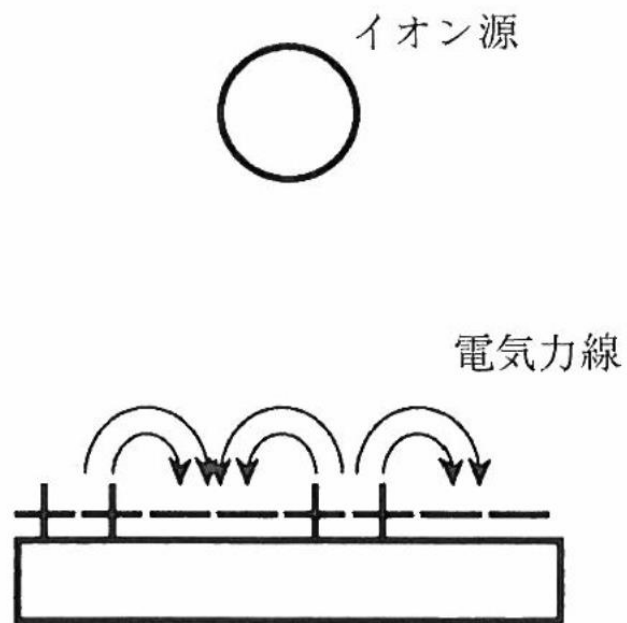


図 2.4 除電の問題点（帯電物体表面に正負の電荷が混在する場合）<sup>3)</sup>



### 2. 1. 3 除電装置（イオナイザー）の種類

除電装置（イオナイザー）は、イオンの生成方式により、表 2.2<sup>9)</sup> のように分類され、コロナ放電式（電圧印加式、自己放電式）、放射線式、軟 X 線式、紫外線式などがある。また、コロナ放電式イオナイザーは、コロナ放電発生のための高電圧の印加方法によって、表 2.3<sup>9)</sup> のように分類される。さらに、電圧印加式のコロナ放電式イオナイザーには、その形状などにより、表 2.4<sup>9)</sup> のような種類がある。これら様々なイオン生成方式や形状などの組合せにより、最適な除電方式を決定し、静電気対策を実施する。

表 2.2 各種イオン生成方式とその原理<sup>9)</sup>

方式	原理
コロナ放電式	電界集中による空気の局所的絶縁破壊作用
放射線式	放射性同位元素からのアルファ粒子による電離作用
軟 X 線式	軟 X 線の光子の非弾性散乱による光電子放出作用
紫外線式	紫外線の光子吸収による電子放出作用

表 2.3 コロナ放電式イオナイザーのイオン発生、制御方式の種類<sup>9)</sup>

イオン発生方式		除電電極部の構成および制御方式
電圧印加式	交 流	正・負共通の放電針と接地極を装備し、この放電針に商用周波数の高電圧を印加して、交流電界の切換えにより、正/負のイオンを交互に発生させる。印加電圧は一定または可変。
	直 流	正極と負極の独立した放電針を装備し、それぞれの放電針に正と負の直流高電圧を定常的に印加して、つねに正もしくは負のイオンを発生させる。印加電圧は一定または可変。
	パルス 直 流	正極と負極の独立した放電針を装備し、それぞれの放電針に正と負のパルス状の高電圧を交互に印加し、正と負のイオンを間欠的に発生させる。印加電圧および印加時間は可変。
自己放電式	(直流)	放電電極を導電性繊維束で構成。導電性繊維束は接地状態であり、電源を使用せず、コロナ放電は帯電物体の電圧を利用するので、外的な制御の余地はない。

表 2.4 電圧印加式コロナ放電式イオナイザーの種類<sup>9)</sup>

型 式		適 用
標準型	バー型	繊維、紙、フィルムなどの一般的な帯電物体の除電
	ポイント型	局所部分の帯電体の除電
送風型	バー型	離れた位置にある一般的な帯電物体の除電
	ノズル型	複雑な形状の帯電物体の除電
	フランジ型	パイプラインに設置し、粉体などの除電
	ガン型	塗装前などの塵埃の除去が必要な場合の除電
	ブロウ型	卓上型、オーバヘッド型、層流フード型、室内型など
防爆型	内圧防爆型	爆発危険場所での除電、工場電気設備防爆指針に適合
	特殊防爆型	爆発危険場所用、除電電極は標準型と同一構造

## 2. 1. 4 除電性能の評価方法

イオナイザーには多くの種類があり、特性や除電効果が異なるため、機器の特性を良く理解して使用することが必要である。発生した空気イオンによって帯電物体の電荷を中和することが目的であるため、いかに速やかに帯電物体を除電できるかを、除電性能を測定して評価する。除電性能の評価方法は、大別して、有効除電電流の測定と、帯電プレートモニタによる電位減衰時間、イオンバランスの測定がある。以下にその概要を示す。

### (1) 有効除電電流による性能評価<sup>9,10)</sup>

主に、バータイプのイオナイザーの除電性能評価で用いられる、有効除電電流の測定装置の構成を図 2.5<sup>9)</sup> に示す。直流高圧電源により、+5kV または-5kV を印加した模擬帯電物体（金属板）に、距離 50mm を隔てて動作させたイオナイザーからの空気イオンを暴露し、金属板に流れる電流を電流計で測定する。この電流計で測定される電流値が有効除電電流である。ここで測定される有効除電電流は、測定電極である模擬帯電物体から割り出された単位長さ当たりのイオン量として、除電性能を判断することができる。金属板に+5kV を印加したときは、負イオンによる有効除電電流を、金属板に-5kV を印加したときは、正イオンによる有効除電電流を測定したことになる。

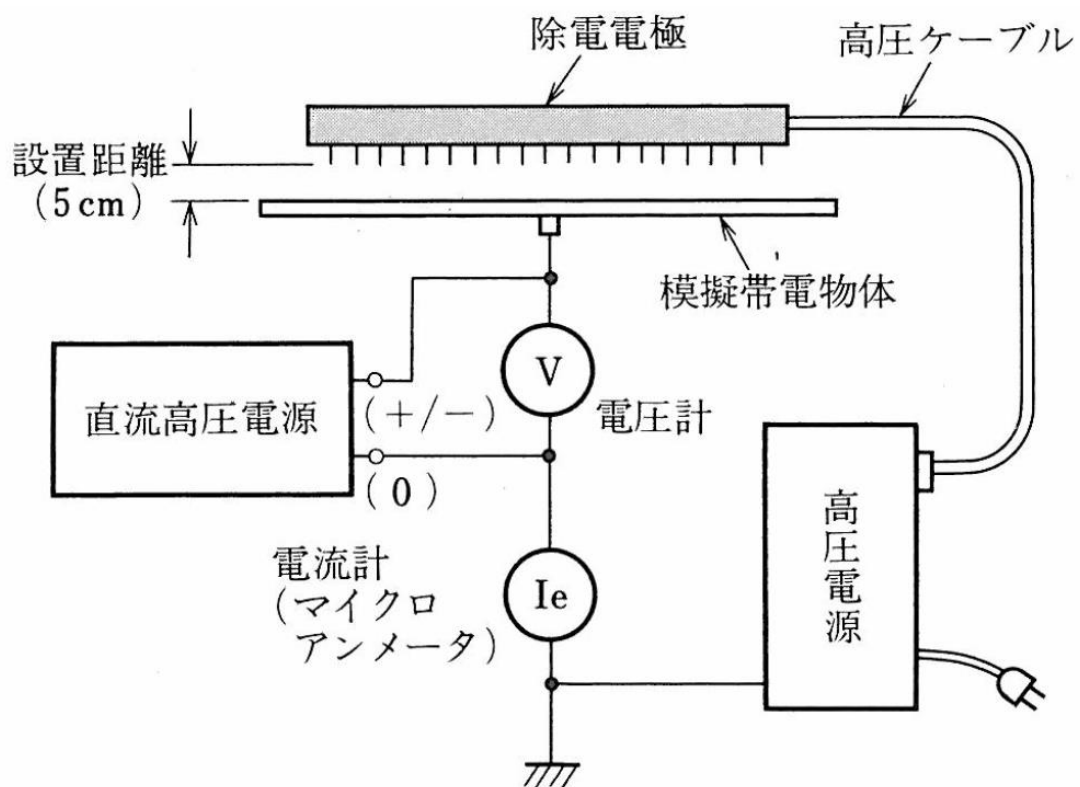


図 2.5 有効除電電流測定装置の構成<sup>9)</sup>

## (2) 帯電プレートモニタによる性能評価<sup>9,11)</sup>

帯電プレートモニタによる電位減衰時間、イオンバランスの測定は、USA ANSI、ESD協会によるEOS/ESD Std. 3.1、IEC 61340 5-1、RCJS-5-1:2010など多くの機関で規格化されている。帯電プレートモニタは、図2.6<sup>9)</sup>に示すように、金属プレート(約15cm角、静電容量が20pF±2pF)と非接触型電位計、高圧電源、減衰時間タイマから構成されている。測定は、この金属プレートに高圧電源で電圧を印加し、その電位がイオナイザーからのイオンにより減衰する時間を計測する。金属プレートの電位には上限(±1000V)と下限(±100V)のしきい値を設け、この2点間の減衰時間を電位減衰時間(除電時間)とする。電位減衰時間が早いほど除電性能が優れ、金属プレートを正極に帯電させた場合は負イオンによる除電性能を、負極に帯電させた場合は正イオンによる除電性能を評価したことになる。測定結果が「時間」で表されることから、イオナイザーの効果を判断しやすい測定と言える。また、金属プレートを一時的に接地して残存電荷を除去した後、帯電プレートモニタの”0”電位を確認し、イオナイザーからの正負イオンに暴露したときに測定される金属プレートの電圧変化を、イオンバランス(またはオフセット電位)と呼ぶ。この測定は、イオナイザーが発生したイオンの時間的、空間的な正負のバランスを評価するものである。

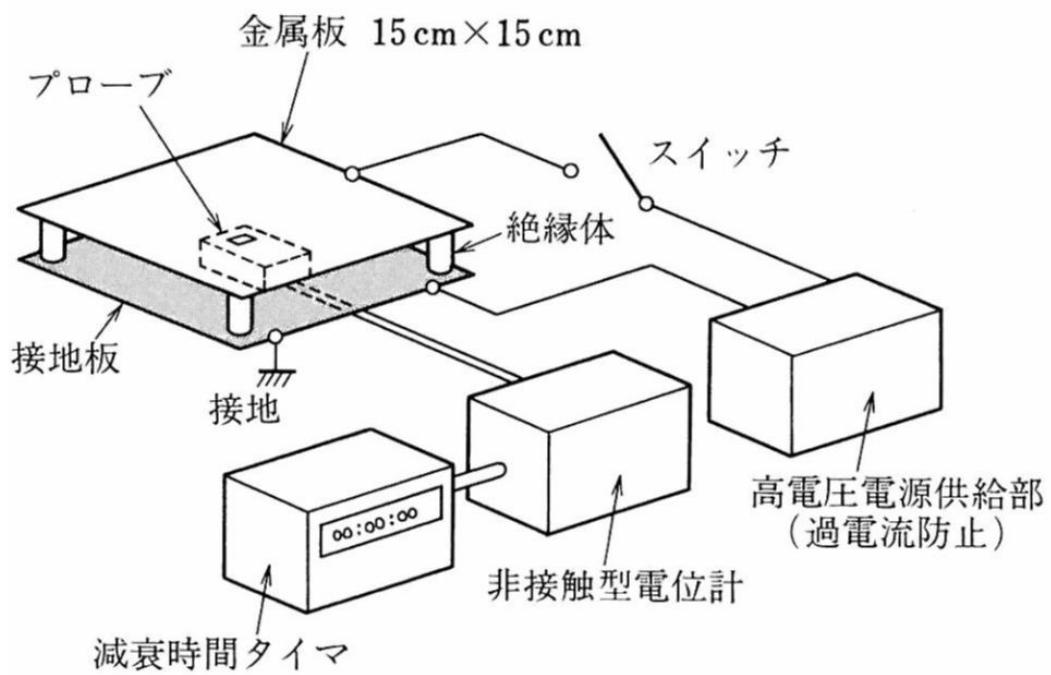


図 2.6 帯電プレートモニタの構成<sup>9)</sup>

## 2. 2 クリーンルームにおける静電気対策

近年の半導体や液晶製造などの電子デバイス産業では、クリーンルームに代表されるクリーン化の技術が大きな役割を担っている。これらのクリーンルームには、微粒子やガスなどの清浄度レベル、さらには温湿度や静電気など、数多くの制御すべき要素がある。なかでも静電気は、製造環境のいたるところで常に発生し、微粒子汚染の助長やデバイス破壊など、製品の歩留まりや信頼性を低下させる直接的な原因となっており、深刻な問題となっている。そのため、クリーンルームにおける静電気対策は、電子デバイス製造環境においては必要不可欠な技術となっている。

### 2. 2. 1 クリーンルームにおける静電気障害<sup>1, 12)</sup>

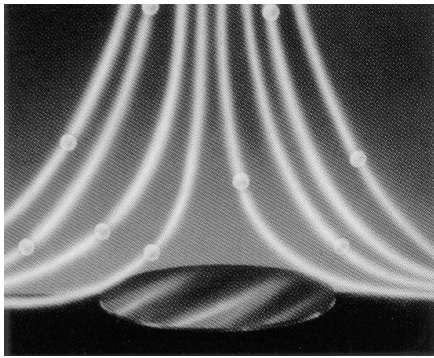
クリーンルームにおける静電気障害は、①静電気の力学現象による障害と、②静電気の放電現象による障害の2つに大別される。クリーンルームにおける代表的な静電気障害を以下に示す。

#### ①静電気の力学現象による障害

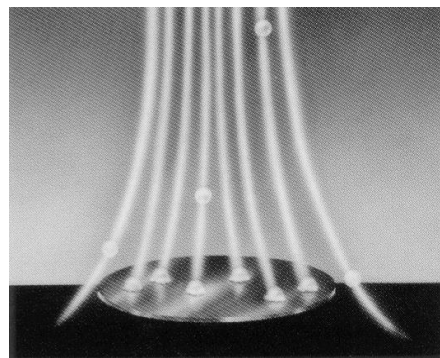
- ・静電気力による微粒子付着、表面汚染

(ESA : Electrostatic Attraction)

帯電したデバイス、もしくは微粒子の静電気力（主にクーロン力）により、デバイスに微粒子が付着し、表面が汚染される（図 2.7<sup>13)</sup>）。以下に詳細に述べる。



ウェハの表面電位 0V



ウェハの表面電位 4kV

図 2.7 垂直一方向流 (0.3m/s) 中でのウェハ表面に対する  
微粒子沈着の可視化写真 (模式図) <sup>13)</sup>



帯電した物体表面への微粒子付着が静電気帯電によって促進されることは、以前から経験的に知られていたが、1987年に、ミネソタ大学のLiuら<sup>14)</sup>や、それに続く多くの研究者<sup>15-17)</sup>によって、ウェハやガラス基板等の微粒子汚染への静電気力の影響が、理論的かつ、定量的に、把握されるようになった。それにより、静電気が半導体デバイスや液晶などの製品の歩留りに重大な影響を与えることが、再認識されるようになった。以下に、Liuらの提唱した微粒子沈着モデルについて説明する。

微粒子のウェハ上への付着は、一般に式 2.4 で表される平均沈着速度  $V_d$  によって評価される。この沈着速度は、単位時間、単位面積当たりに、ウェハに付着する微粒子数（沈着フラックス  $J$ ）に比例する。また、式 2.5～式 2.7 はブラウン拡散、静電気力、重力による沈着速度  $V_D$ 、 $V_e$ 、 $V_g$  をそれぞれ表している。これらの沈着速度を合計したものが、ウェハ上への平均沈着速度  $V_d$  となる。

$$V_d = J/N = V_D + V_e + V_g \quad (2.4)$$

$$V_D = 1.08(D/D_w)S_c^{1/3}R_e^{1/2} \quad (2.5)$$

$$V_e = C_c n_p e E / 3\pi\mu d_p \quad (2.6)$$

$$V_g = C_c \rho_p d_p^2 g / (18\mu) \quad (2.7)$$

ここで、

- $J$  : ウェハ上への粒子の沈着フラックス [個/m<sup>2</sup>・s]  
 $N$  : ウェハ周りの粒子の平均濃度 [個/m<sup>3</sup>]  
 $V_D$  : ブラウン拡散による粒子の平均沈着速度 [m/s]  
 $V_e$  : 静電気力による粒子の平均移動速度 [m/s]  
 $V_g$  : 重力による粒子の終末沈降速度 [m/s]  
 $D$  : 拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]  
 $D_w$  : ウェハ直径 [m]  
 $S_c$  : シュミット数 [—]  
 $R_e$  : ウェハ直径  $D_w$  基準のレイノルズ数 [—]  
 $n_p$  : 電荷個数 [個]  
 $e$  : 電荷素量  $1.6 \times 10^{-19}$  [A・s]  
 $E$  : 平均電界強度 [V/m]  
 $\rho_p$  : 粒子密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\mu$  : 空気の粘度 [kg/m・s]  
 $d_p$  : 粒子直径 [m]  
 $C_c$  : カニンガムの補正係数 [—]  
 $g$  : 重力加速度 9.8 [m/s<sup>2</sup>]

式 2.5 は、Liu らが、Sparrow ら<sup>18)</sup> の得たナフタリンを円板上から昇華させた時の物質移動の実験式を、水平に置かれたウェハ上へのブラウン拡散による沈着に適用して得られた式である。垂直に置かれたウェハ上への沈着の場合は、式 2.5 の係数 1.08 を 0.739 に置換えれば良い。式 2.6 は、 $n_p$  個の電荷を持つ荷電粒子が、電界強度  $E$  下で受ける静電気引力（クーロン力） $n_p e E$  と、それによる移動の際、荷電粒子が受ける空気の抗力  $3 \pi \mu d_p V_e / C_c$  との釣合いの式より得られる。ただし、ウェハ表面では電界強度  $E$  に分布があるので、式 2.6 では  $E$  は平均電界強度を表している。よって、静電気による沈着速度  $V_e$  も平均値を表す。また、式 2.7 は、粒子に働く重力  $\pi \rho_p d_p^3 g / 6$  と、重力沈降の際受ける空気の抗力  $3 \pi \mu d_p V_g / C_c$  との釣合いの式より得られる。

次に、図 2.8 は、Liu らが提案した上記のウェハ上への微粒子沈着モデルを、江見<sup>17)</sup> が実験的に検証したものである。2inch ウェハを 10cm/s の下降整流下に水平に置いて、粒子とウェハが共に帯電していない場合と粒子とウェハが互いに逆極性に帯電している場合（クーロン力が作用している場合）で検証している。各粒子径における粒子上の電荷数の条件は、粒子とウェハが共に帯電していない場合は 0 個、互いに逆極性に帯電している場合は 1 個となっている。実際の製造環境においては、発生する微粒子上の電荷の個数を推定することは難しいが、一般に大気中では両極イオン濃度が約  $10^3$  個/cm<sup>3</sup> であり、数十分で表 2.5<sup>19)</sup> に示すような Boltzmann 平衡電荷分布の状態になることが知られている。粒径が  $0.01 \mu\text{m}$  以下のような微粒子ではそのほとんどが無帯電で、粒径が大きくなるにつれ荷電粒子数の割合が増えるが、正の荷電粒子と負の荷電粒子の存在割合は等量である。また、イオナイザーのような高濃度の両極性イオンを発生する環境下においては、ごく短時間で Boltzmann 平衡電荷分布の状態に達すると言われる<sup>8, 19)</sup>。図 2.8 に示すように、実験データ（各シンボルのプロット）にばらつきはみられるが、計算結果（実線）と比較的良く一致することが分かる。粒子径  $d_p$  が  $1 \mu\text{m}$  以上では重力が支配的で、 $0.5 \mu\text{m}$  以下の粒子に対してはブラウン拡散または静電気力が支配的となる。粒子上の荷電数  $n_p=0$  個、ウェハ帯電電位  $V = 0\text{V}$  の時の左上がりの曲線は、ブラウン拡散による微粒子沈着速度を、 $n_p=-1$  個（1 個の負極性電荷  $e = -1.602 \times 10^{-19}\text{C}$  を意味する）、 $V = 100 \sim 1000\text{V}$  時の左上がりの曲線は、ブラウン拡散と静電気力の和による沈着速度を示している。この  $0.5 \mu\text{m}$  以下の領域では、ブラウン拡散のみの沈着速度に比べて、静電気力により、沈着速度が飛躍的に増大することが分かる。また、粒径が小さいほど、微粒子沈着速度が大きくなっていることから、クリーンルームにおける制御粒径が小さくなるほど、静電気力（クーロン力）による微粒子汚染が、重大な問題になることが予想できる。

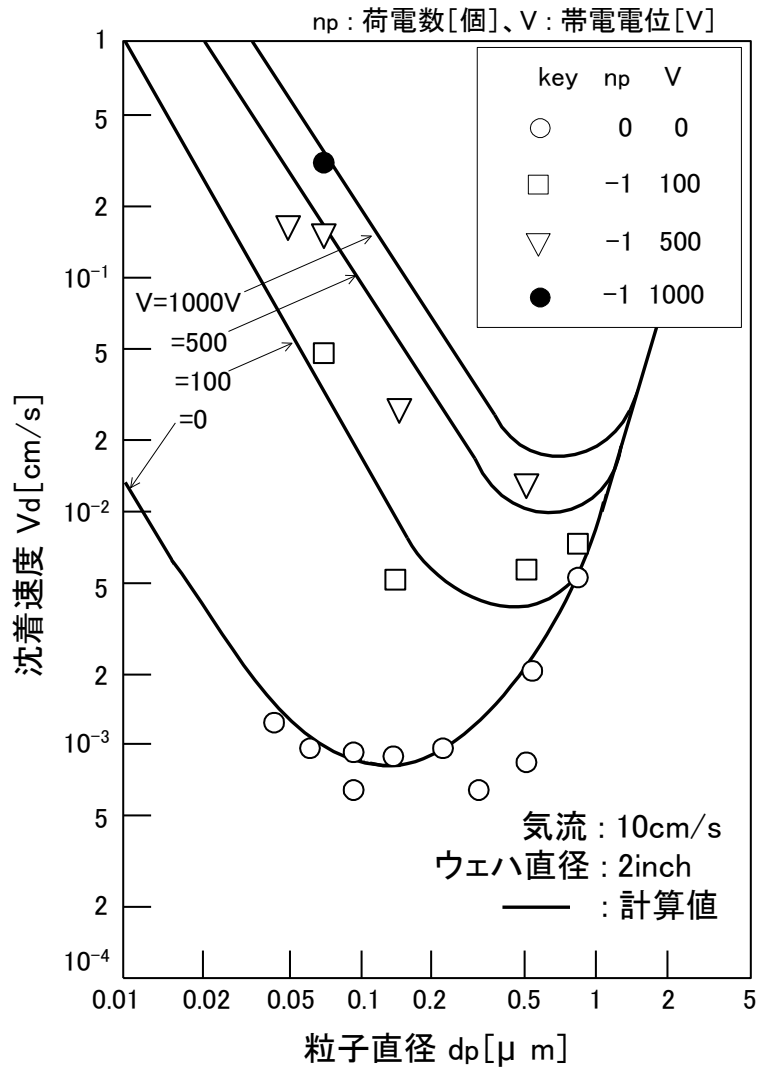


図 2.8 水平に置かれたウェハに一定電圧を印加した時の帯電・無帯電粒子の沈着速度<sup>17)</sup>

表 2.5 Boltzmann 平衡荷電分布のときのエアロゾル粒子の荷電分布数<sup>19)</sup>

粒 径 ( $\mu\text{m}$ )	平 均 荷電数	下記の荷電数をもつ粒子の全体に占める割合 (%)									
		<-3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	>+3	
0.01	0.007				0.3	99.3	0.3				
0.02	0.104				5.2	89.6	5.2				
0.05	0.411			0.6	19.3	60.2	19.3	0.6			
0.1	0.672		0.3	4.4	24.1	42.6	24.1	4.4	0.3		
0.2	1.00	0.3	2.3	9.6	22.6	30.1	22.6	9.6	2.3	0.3	
0.5	1.64	4.6	6.8	12.1	17.0	19.0	17.0	12.1	6.8	4.6	
1.0	2.34	11.8	8.1	10.7	12.7	13.5	12.7	10.7	8.1	11.8	
2.0	3.33	20.1	7.4	8.5	9.3	9.5	9.3	8.5	7.4	20.1	
5.0	5.28	29.8	5.4	5.8	6.0	6.0	6.0	5.8	5.4	29.8	
10.0	7.47	35.4	4.0	4.2	4.2	4.3	4.2	4.2	4.0	35.4	

② 静電気の放電現象による障害

- ・ 静電気放電による集積回路の破壊 (ESD : Electrostatic Discharge)

帯電したデバイス、もしくは人体や工具、生産装置などからの放電による大電流が回路素子を貫通することによって、回路が熱破壊される (図 2.9<sup>1), 20)</sup>。

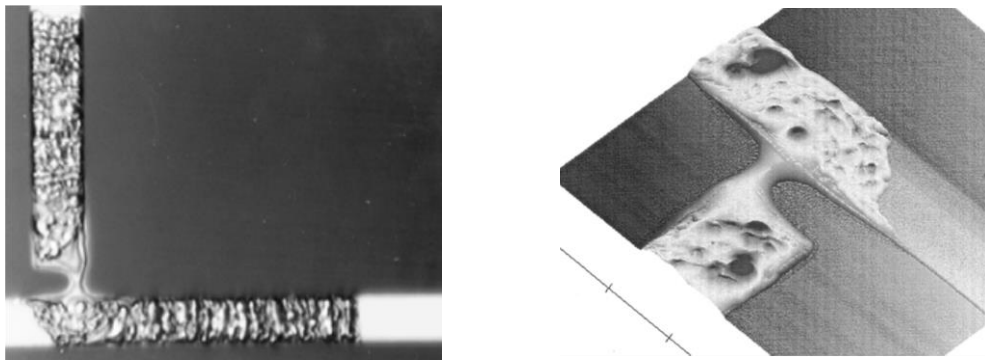


図 2.9 放電による素子 (フォトマスク) の破壊<sup>1), 20)</sup>

- ・ 放電時の電磁波による生産装置の誤動作、データ破壊  
(ESI : Electrostatic Interference)

放電 (ESD) によって発生する電磁波によって、生産装置内の制御用 LSI やメモリ用 LSI の誤動作を引き起こす<sup>1)</sup>。

## 2. 2. 2 クリーンルームにおける静電気対策と問題点

クリーンルームにおける静電気対策は、特に清浄度などを管理していない環境等で静電気対策を実施する場合と基本的には同様の手法であり、接地や加湿といった導電化による静電荷の漏洩・緩和と、イオナイザーによる空気イオンを用いた除電、の2つの方法が主に用いられる。しかし、電子デバイス製造などのクリーンルームにおいては、接地によってデバイスが汚染される場合や、加湿した際の水分によってデバイスに悪影響が及ぶ危険があるため<sup>21, 22)</sup>、後者のイオナイザーによる除電が有効である。

クリーンルーム用のイオナイザーとしては、コロナ放電式イオナイザーが主流となっているが<sup>23)</sup>、より高清浄度のプロセスでの除電要求から、イオン生成の際に発塵が無い、低エネルギーのX線（以下軟X線）をイオン化源とする軟X線イオナイザーも用いられるようになった<sup>24-26)</sup>。しかしながら、これらイオナイザーのクリーンルームでの使用にあたっては、コロナ放電式イオナイザーの電極からの発塵現象<sup>27, 28)</sup>や、軟X線イオナイザー使用時の人体の被曝防止対策<sup>29-31)</sup>など、種々の問題があることが知られている。これらの問題点については、次節以降で詳細に述べる。

### 2. 2. 3 コロナ放電式イオナイザーの問題点（電極からの発塵現象）

コロナ放電式イオナイザーの使用にあたっては、前述したように、放電電極から発塵することが指摘されており、かねてから重大な問題となっている<sup>27, 28)</sup>。表 2.6<sup>32)</sup> は、鈴木らが行った、クリーンルーム（0.1 $\mu$ m クラス 10）内で、3 タイプのコロナ放電式イオナイザーからの定常状態における発塵濃度の測定結果の一例である。いずれのイオナイザーからも、0.1 $\mu$ m 以下の粒子が多数発生していることがわかる。また、図 2.10<sup>28, 33)</sup>にも示されるように、イオナイザー電極から生成する粒子の粒径分布は、0.1 $\mu$ m 以下が中心であることがわかる。

表 2.6 各種イオナイザーからの発塵濃度（一例）<sup>32)</sup>

Particle Detector	Particle Diameter Range [ $\mu$ m]	Particle Concentration [particles/cft]		
		Pulsed-DC	AC	DC
CNC (TSI 3020)	0.03<	$1.2 \times 10^3$	$1.9 \times 10^3$	$1.3 \times 10^5$
LPC (PMS 101)	0.1~0.3	$0.3 \pm 0.5$	$0.3 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.2$
	0.3~0.5	$0.2 \pm 0.1$	0	$0.1 \pm 0.1$
	0.5~1.0	0	0	$0.1 \pm 0.1$

[Note]

- 1) Sampling point: at 1.25m below each ionizer
- 2) Unidirectional airflow: 0.31m/s
- 3) Air cleanliness of clean room: 0.1 $\mu$ m Class 10 ( $0.4 \pm 0.2$ particles/cft)

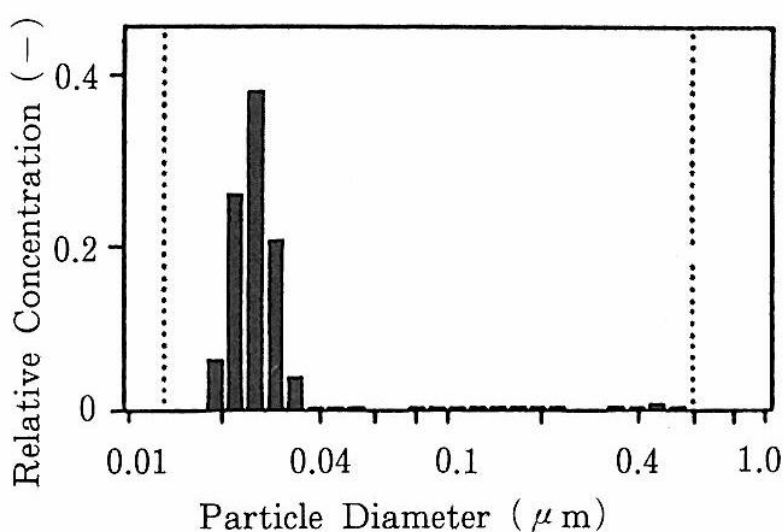


図 2.10 イオナイザー電極から生成する粒子の粒径分布<sup>28, 33)</sup>



電極からの粒子生成のメカニズムについては、十分に解明されていない。しかし、多くの研究者ら<sup>27, 28, 34, 35)</sup>が行った研究結果から、①クリーンルームの清浄空気に含まれる微量不純物の電極上への付着（析出）および再飛散と、②電極自身の摩耗の2つのメカニズムによって粒子が生成されているものとみられている。

表 2.7<sup>28)</sup> および図 2.11<sup>28)</sup> は、並木が行った、イオナイザー電極からの粒子生成メカニズムについて検討を行った結果である。表 2.7によると、イオナイザーのタングステン電極における粒子生成機構は電極母材の摩耗と、クリーンルーム空気中のガス-粒子変換、外来粒子の付着、の3つに分類されている。図 2.11 は、高清浄度のクリーンルーム内（クラス 1）で、イオナイザー電極直下と天井の ULPA フィルター直下から捕集した粒子を分析した結果である。ケイ素（Si）が主に検出されているものの、電極母材であるタングステン（W）が検出下限以下であることから、電極の摩耗が粒子生成に与える影響は比較的小さいとしている。また、清浄度の高いクリーンルーム内での測定であることから、外来粒子の付着は考えにくく、イオナイザー電極からの粒子生成においては、Si 成分のガス-粒子変換による SiO<sub>2</sub> の生成が主なメカニズムであるとしている。さらに、イオナイザー電極から生成した粒子の主成分である Si の起源について、クリーンルーム構成材であるシリコンシーラントから脱ガスしたシロキサンであると報告している。建設直後のクリーンルームにおける空気中のシロキサン濃度が 9.4 μg/cm<sup>3</sup> に達するという報告<sup>36)</sup> も併せて考慮すると、イオナイザー電極からの生成粒子がシロキサンのガス-粒子変換によるものである可能性は非常に高いと考えられる。この微粒子が電極に析出して成長し、製品ダメージのリスクが高い大きさの粒子として再飛散した場合には、重大な障害となることが判る。

表 2.7 イオナイザーのタングステン電極における粒子生成機構<sup>28)</sup>

機構	元素	反応過程
電極母材の摩耗	W	$M \rightarrow MO_x$ (M: 金属)
ガス-粒子変換	S	$SO_2 \rightarrow$ 硫酸塩
		$NO_x \rightarrow$ 硝酸塩、アンモニウム塩
	C	$CO_2 \rightarrow$ 炭酸塩
	C	揮発性、不揮発性 $HC \rightarrow HC$ (カルボン酸等)
外来粒子の付着		(クーロン力、影像力、グレイディエント力)
不明	Si (?)	LMCS $\rightarrow$ SiO <sub>2</sub> (?)

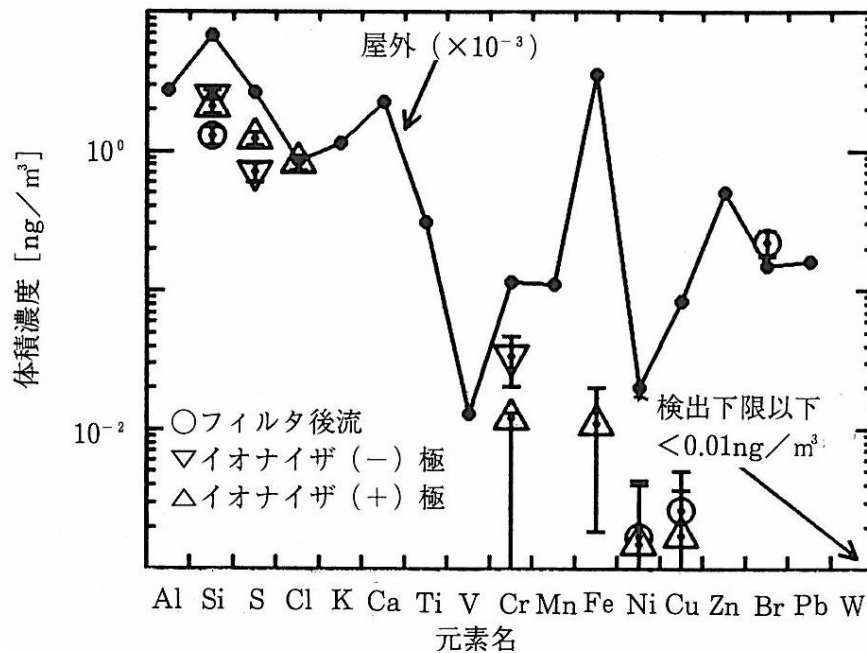
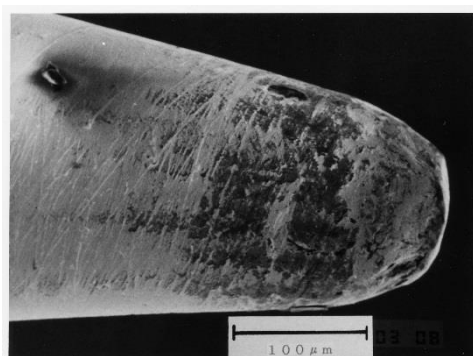


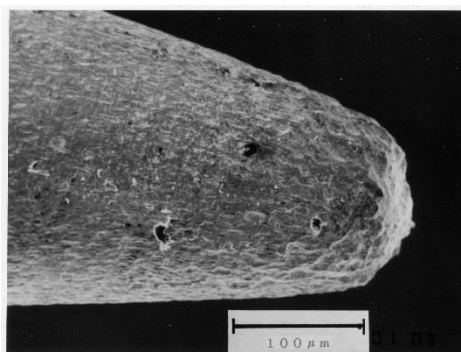
図 2.11 イオナイザー電極直下、フィルター直下、屋外における粒子の元素濃度 (PIXE 法)<sup>28)</sup>

一方、図 2.12<sup>32)</sup> は、鈴木らが行った、約 2000 時間使用したイオナイザー電極の摩耗状態を SEM で観察したものである。電極材質はトリウム・タングステン合金で、未使用電極に比較して正極電極が著しく摩耗している。また、阪田ら<sup>37,38)</sup> もタングステン電極において電極が摩耗する現象を SEM や AES 分析、発塵測定にて確認しており、同様に正極電極の摩耗が著しいことを報告している。正極電極の摩耗が著しい原因としては、正のコロナ放電では、電極表面に  $O_2^-$ 、 $CO_3^-$ 、 $NO_2^-$  などのマイナスイオンが吸収される際に、酸化を伴うスパッタリングを受けることにより、摩耗が促進されると考えられている。

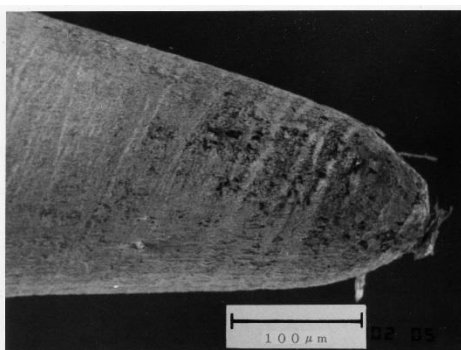
以上より、コロナ放電式イオナイザーは、①クリーンルーム中空気に含まれる微量不純物の電極上への付着（析出）および再飛散と、②電極自身の摩耗によって発塵しており、クリーンルームで使用する場合には、発塵源となってしまう問題がある。現状では定期的に電極先端の清掃や交換を行うなどのメンテナンスが必須となっている。



(a) 未使用電極



(b) 超音波洗浄後の正極電極



(c) 超音波洗浄後の負極電極

図 2.12 約 2000 時間使用した後の電極（トリウム・タングステン合金）の摩耗状態（175 倍）<sup>32)</sup>

#### 2. 2. 4 軟 X 線イオナイザーの問題点（使用上の注意点）<sup>39)</sup>

軟 X 線イオナイザーは、コロナ放電式と異なり軟 X 線によってガス分子を直接イオン化してイオンを生成する、光照射式のイオナイザーの一種である。特徴は、除電対象近傍の雰囲気で大濃度のイオンを生成するため、気流の影響を受けることなく短時間での除電が可能で、残留電位が 0V であること、さらに従来のコロナ放電式では不可能であった完全無発塵での除電が可能なことである。図 2.13<sup>40)</sup> と表 2.8<sup>40)</sup> に代表的な軟 X 線イオナイザーとして、浜松ホトニクス(株)製フォトイオナイザ L9490 の外観と仕様を示す。



図 2.13 軟 X 線イオナイザー（浜松ホトニクス(株)製 L9490）の外観<sup>40)</sup>

表 2.8 軟 X 線イオナイザー（浜松ホトニクス(株)製 L9490）の仕様<sup>40)</sup>

項 目	仕様
管電圧(DC)	9.5 kV
管電流	150 $\mu$ A
出力窓材	ベリリウム(厚さ0.3mm)
イオン生成(軟X線出射)角	約130° (円錐状)
軟X線波長	1.3~4.1 Å (ピーク 2 Å)
軟X線エネルギー	3~9.5keV(ピーク 6keV)

軟 X 線イオナイザーの使用上、安全面から注意しなければならない点としては、イオン化源として放射線の一種である軟 X 線を用いていることが挙げられる。図 2.14<sup>29)</sup> に示すように医療用レントゲン撮影に使用される X 線に比べると、波長が長く数十分の一のエネルギーと言われているが、人体が直接軟 X 線に被曝した場合は、人体に悪影響を及ぼすため遮蔽が必要となり、安全面から以下の法規が適用される。

(1) 電離放射線障害防止規則（電離則）

(2) 労働安全衛生法

(3) 労働安全衛生法施行令

(4) 労働安全衛生規則

軟 X 線イオナイザー（L9490）は、（4）労働安全衛生規則第 88 条第 1 項の「計画の届出をすべき機械等」を規定した放射線装置に該当し、使用事業者は所轄の労働基準監督署長に設置する 30 日前までにその計画の届出が必要である（（2）労働安全衛生法第 88 条第 1 項「計画の届出」）。また、防護設備の外側における外部放射線による実効線量（1cm 線量当量）と空気中の放射線物質による実効線量との合計が、3 月間につき 1.3mSv を超えないものであり、かつ、X 線照射中作業者の全部又は一部が防護設備の内部に立ち入ることができないように、インターロック等の安全装置が具備されている場合は、エックス線作業主任者の選任（（1）電離放射線障害防止規則第 46 条）を必要としない。ただし、防護設備内部は管理区域にあたり、（1）電離放射線障害防止規則第 2 章第 3 条の「管理区域の明示等」の規定に該当するため、標識による管理区域の明示が必要である。軟 X 線の遮蔽に関しては、電離則などの法的な要求を満足しているかどうかに関わらず、作業者の安全を考慮して適切に実施しなければならない。図 2.15<sup>40)</sup> に示すように、遮蔽材として、2mm 厚以上の塩化ビニル板や 0.5mm 厚以上のアルミニウム板、0.1mm 厚以上の鋼板を使用することで、ほぼ 100%遮蔽可能で、防護設備において開口部などを的確に処理すれば比較的容易に遮

蔽できる。

一方で、性能面での注意点としては次の点が挙げられる。生産装置の内部などの狭小部では、様々な機器・部品が込み入って取り付けられているため軟X線イオナイザーの設置スペースを確保することが困難になっている。軟X線イオナイザーは、軟X線が照射されている空間の除電対象近傍で高濃度のイオンを生成するが、軟X線が直接届かないエリアについては除電効果が得られないため、生産装置内のような狭小部ではイオナイザーの設置位置が無く、本来持っている除電効果が得られない。そのため、別の対策が必要とされていた。

以上より、軟X線イオナイザーをクリーンルームで使用する場合、発塵などのコンタミネーションに係わる問題は無いが、人体の被曝防止のための安全対策が必須なことや、狭小部での除電効果が得られない点など、取り扱い上の難点が挙げられる。

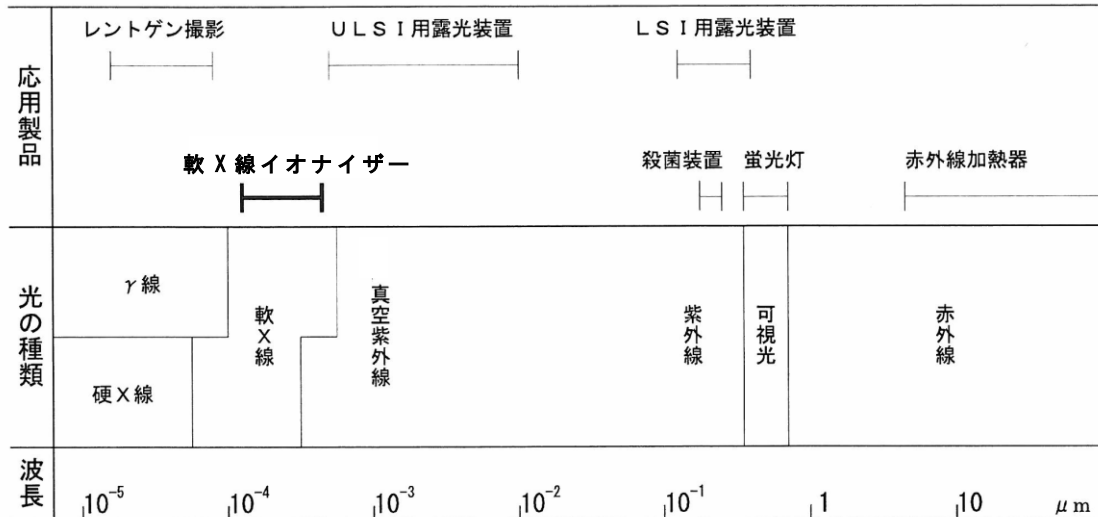


図 2.14 波長分布と応用製品例 <sup>29)</sup>

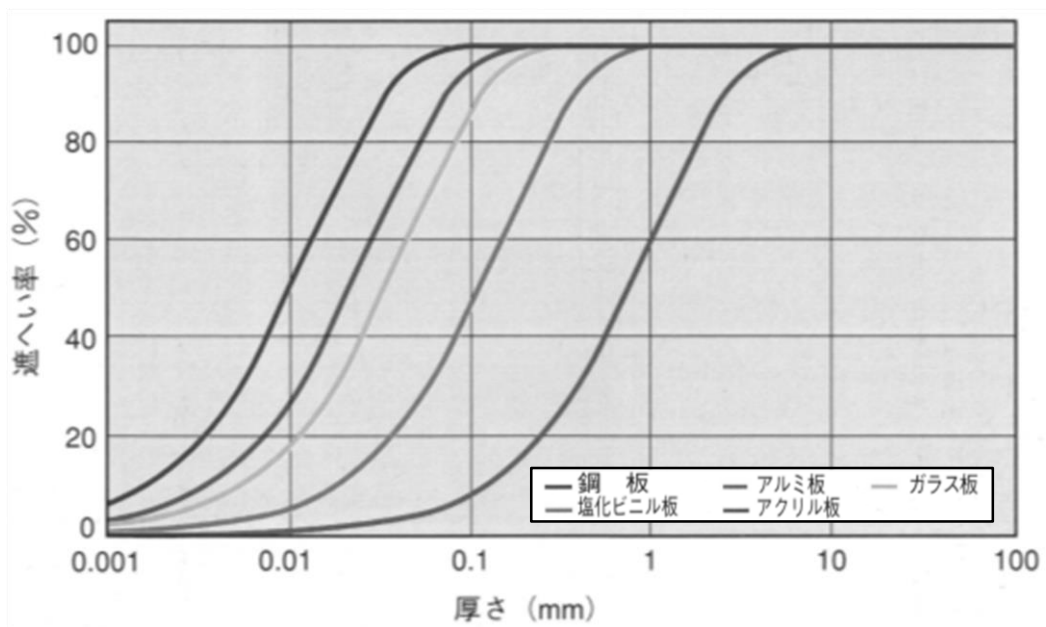


図 2.15 各種材料による軟 X 線の吸収率（遮蔽率）<sup>40)</sup>



### 2. 3 まとめ

第2章前半では、帯電体の除電方法とその理論、および除電装置（イオナイザー）の種類と評価方法について概要を述べた。次に後半では、クリーンルームにおける静電気対策と静電気障害について、静電気力が表面汚染を助長する現象を中心に詳細に説明し、電子デバイス産業において静電気対策が必要不可欠であり、コンタミネーションコントロールの観点からも重要なファクターであることを明らかにした。またクリーンルームにおける静電気対策の問題点について述べ、コロナ放電式イオナイザーの電極からの発塵メカニズムに関する既往の報告例から、放電電極からの発塵は、クリーンルームエア中のシロキサンガスが粒子化し、電極上に堆積する現象と、電極自身の摩耗の、2つのメカニズムによって起こることを説明した。また、軟X線式イオナイザーの使用上の問題点について、安全面、性能面から詳細に説明した。

## 第2章 参考および引用文献

- 1) 空気清浄協会編：クリーンルーム環境の計画と設計第3版，オーム社（2013）pp. 24-26
- 2) 労働省産業安全研究所：産業安全研究所技術指針-静電気安全指針-RIIS-TR-78-1（1988）pp. 56-64
- 3) 水野彰：静電気とコンタミネーションコントロール，クリーンテクノロジー，3巻11号（1993）p. 11
- 4) 二澤正行：図解静電気管理入門，工業調査会（2004）pp. 43-45
- 5) 労働安全衛生総合研究所：労働安全衛生総合研究所技術指針-静電気安全指針 2007-JNOSH-TR-N0. 42（2007）pp. 12-14
- 6) 村田雄司：除電装置と除電技術，シーエムシー出版（2004）pp. 193-199
- 7) 日本電子部品信頼性センター：平成12年度静電気研究委員会研究成果報告書 R-12-ES-01（2001）pp. 48-72
- 8) 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社（1981）pp. 315-318
- 9) 静電気学会編：新版 静電気ハンドブック，オーム社（1998）pp. 383-393
- 10) 労働省産業安全研究所：産業安全研究所技術指針-静電気安全指針-RIIS-TR-78-1（1978）pp. 165-177
- 11) 村田雄司：除電装置と除電技術，シーエムシー出版（2004）pp. 101-114
- 12) 鈴木政典，佐藤朋且，鋒治幸，日野利彦：清浄環境における静電気除去技術，クリーンテクノロジー，12巻3号（2002）p. 17
- 13) 阪田総一郎，池鯉鮒悟，井上正憲，吉田隆紀，岡田孝夫：クリーンルーム内の静電気による微粒子沈着，第6回エアロゾル科学・技術研究討論会予稿集（1988）p. 37
- 14) B. Y. H. Liu, B. Fardi, K. H. Ahn: Deposition of Charged and Uncharged Aerosol Particles on Semiconductor wafers, Proceeding of 33<sup>rd</sup> Annual Technical Meeting of the IES (May, 1987) p. 461

- 15) 藤井修二, 謝国平, 金光映: 整流型クリーンルーム内における粒子沈着モデル, 第7回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集 (1988) p. 17
- 16) 阪田総一郎, 岡田孝夫: ウェハ表面へのエアロゾル超微粒子の付着, 第7回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集 (1988) p. 21
- 17) 江見順: 粒子の沈着と静電気の影響, '88 クリーンテクノロジーシンポジウム予稿集 (1988) p. 3-1-1
- 18) Sparrow, E.M, G.T.Geiger: Local and average heat transfer characteristics for a disk situated perpendicular to a uniform flow, J.Heat Transfer, Vol.107 (5.1985) p.321
- 19) ウィリアム C.ハインズ, (早川一也 訳): エアロゾルテクノロジー, 井上書院 (1985) pp. 291-294
- 20) A Study of the Mechanisms for ESD Damage to Reticles: ISI (2001)
- 21) 高塚威, 神戸正純: 分子シミュレーションによるシリコンウェハ表面への各種分子状汚染物質の平衡吸着量, 空気調和・衛生工学会論文集 107 (2006) p. 29
- 22) 鍵直樹, 藤井修二, 湯浅和博, 田中克昌: 有機物質シリコンウェハ表面の吸着特性と水分の影響, 日本建築学会計画系論文集, 517 巻 3 号 (1999) p. 53
- 23) 高橋忠: 静電気除去装置の現状と課題, 空気清浄, 27 巻 6 号 (1990) p. 22
- 24) 鈴木政典, 和泉貴晴, 鋒治幸, 石川昌義: 微弱 X 線イオナイザーの安全な使用方法, クリーンテクノロジー, 10 巻 6 号 (2000) p. 18
- 25) 池鯉鮒悟: 光照射方式イオナイザ「IRISYS シリーズ」, クリーンテクノロジー, 14 巻 7 号 (2004) p. 33
- 26) 稲葉仁: プロセスチャンバ内における除電技術, クリーンテクノロジー, 3 巻 11 号 (1993) p. 45

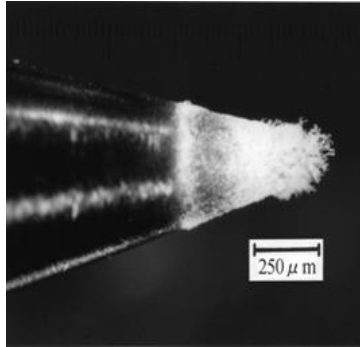
- 27) B. Y. H. Liu, D. Y. H. Pui, W. O. Kinstly, W. G. Fisher : Characterization of Electronic Ionizers for Clean Rooms, presented at the 31<sup>st</sup> Annual Technical Meeting of IES (April/May, 1985)
- 28) 並木則和 : クリーンルーム環境におけるガス-粒子変換-イオナイザ電極における粒子生成に着目して-, クリーンテクノロジー, 4巻7号 (1994) p.67
- 29) 浜松ホトニクス : フォトイオナイザ L9490 取扱説明書 Ver.5
- 30) 稲葉仁 : クリーンルームにおける制電エンジニアリング 生産現場での顧客への貢献, クリーンテクノロジー, 19巻4号 (2009) p.7
- 31) 稲葉仁, 大見忠弘, 吉田隆紀, 岡田孝夫 : 極微弱軟 X線照射除電技術, 静電気学会誌, 18巻1号 (1994) p.34
- 32) 鈴木政典, 山路幸郎 : スーパークリーンルームにおける空気イオン化システムからの発塵特性について, 空気清浄, 26巻5号 (1989) p.48
- 33) Donovan, R.P. : Particle Control for Semiconductor Manufacturing - Chapter 10. Particle Deposition Data : Room Ionization as a Control Method -, Marcel Dekker, Inc., (1990) pp.325-340
- 34) R. P. Donovan, P. A. Rawless and D. D. Smith : Polarity Dependence of Electrode Erosion under DC Corona Discharge, Microcontamination (1986) p.38
- 35) M. Blitshteyn, S. Shelton : Contamination and Erosion of Cleanroom Air Ionizer Emitters, Microcontamination (1985) p.28
- 36) 稲葉仁 : クリーンルームにおける化学汚染防止対策技術, IDEMA Japan News No.62 (2004) p.1
- 37) 阪田総一郎, 岡田孝夫 : コロナ放電極の発塵機構の解析, 静電気学会講演論文集 (1991) p.397
- 38) 阪田総一郎, 岡田孝夫 : クリーンルームにおける静電気障害とイオナイザによる帯電防止, 静電気学会誌, 15巻2号 (1991) p.134
- 39) 村田雄司 : 除電装置と除電技術, シーエムシー出版 (2004) pp.147-152
- 40) 浜松ホトニクス : フォトイオナイザ L9490 カタログ

## 第3章 クリーンルーム用低発塵イオナイザーの開発（コロナ放電式）

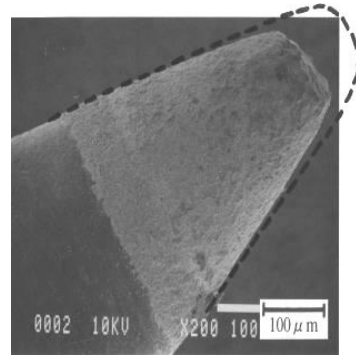
### 3.1 開発の背景と目的

第2章で述べたように、現在電子デバイス製造のクリーンルームで広く用いられているコロナ放電式イオナイザーは、クリーンルーム空気中の不純物（主にシリコンシーラントから脱ガスしたシロキサンが粒子化した $\text{SiO}_2$ 微粒子）の電極への析出・再飛散と、電極自身の摩耗の2つの原因（図3.1）によって発塵していることが知られている<sup>1)</sup>。そのため、清浄環境においては、コロナ放電式イオナイザーが発塵源となってしまう問題が生じていた。鈴木ら<sup>2)</sup>は、これまで、高純度 $\text{N}_2$ ガスで電極周囲をパーズすることでシロキサンの析出を低減するシースエア機能と、耐摩耗性の特殊金属放電電極を搭載した、シースエア式イオナイザーを開発し、コロナ放電式イオナイザーからの発塵に対応してきた。図3.2にシースエア方式の電極構造、図3.3に耐摩耗性特殊金属電極、図3.4にシースエア式イオナイザーの外観をそれぞれ示す。しかしながら、近年の液晶パネル製造におけるガラス基板の大型化に伴い、シースエア式イオナイザーも大型化し、シースエアとして用いる高純度 $\text{N}_2$ ガスの使用量が著しく増加した。そのため、ユーザーから高純度 $\text{N}_2$ ガス（ユーティリティコスト）の削減が求められるようになった。また、耐摩耗性放電電極についても、従来のタングステン電極に比べて摩耗が少ないものの、摩耗はゼロでは無く、年に1回の交換を推奨しているため、更なる摩耗量の低減（長寿命化）が望まれていた。そこで、これまでの方式に代わる、コロナ放電式イオナイザーからの発塵対策が必要となった。

本章では、コロナ放電式イオナイザーを対象に、放電電極へのシロキサン微粒子析出（付着）と電極の摩耗を抑制する新たな対策方法について提示することを目的とした。前者の放電電極への微粒子付着問題については、放電電極を加熱することにより発生する熱泳動力を用いて微粒子の付着を抑制し、製品ダメージのリスクがより高い大きさの粒子として再飛散することを防止する方法、電極の摩耗問題に関しては、新たな電極材質を用いて耐摩耗性を向上する方法を検討した。以降にその結果を述べる。



不純物の析出（付着）



電極の摩耗

図 3.1 電極への不純物析出（付着）と電極の摩耗

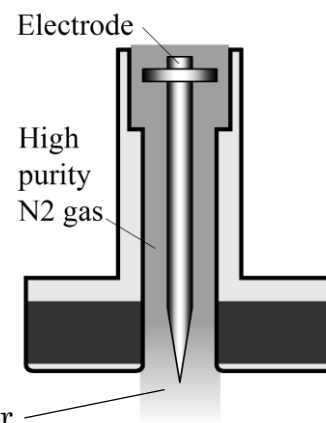
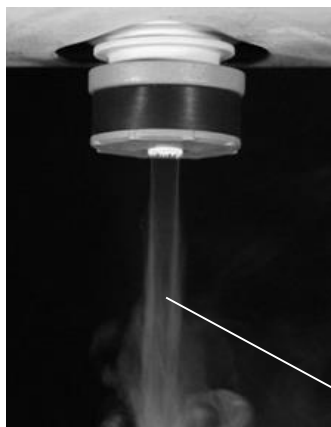
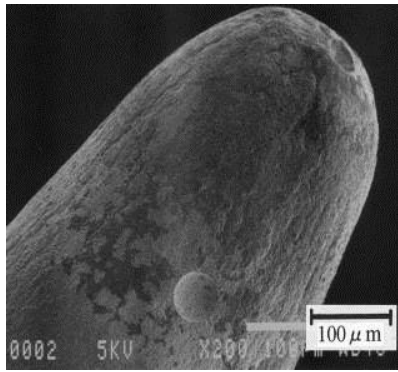
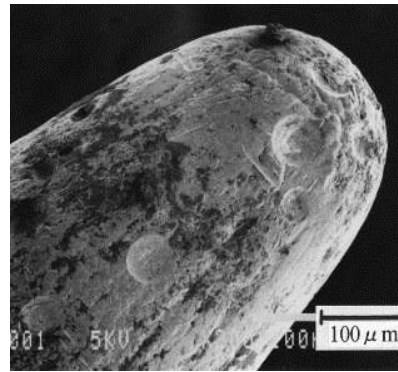


図 3.2 シースエア方式の電極構造



未使用



約 1 年間使用

図 3.3 耐摩耗性特殊金属電極

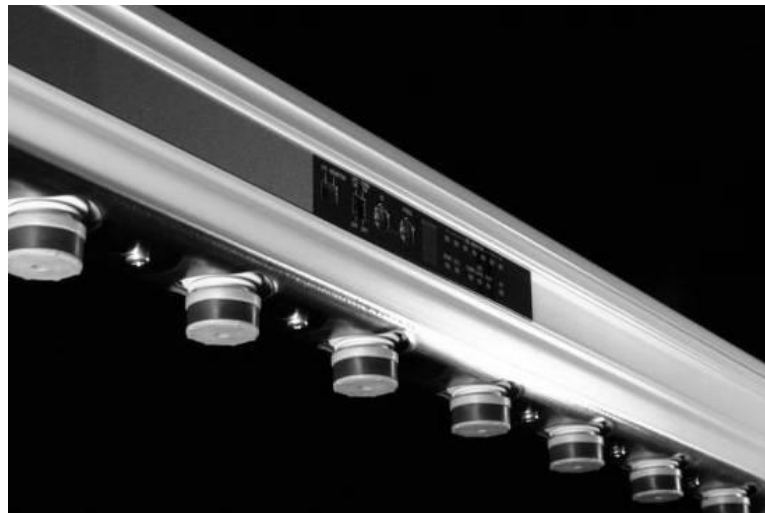


図 3.4 シースエア式イオナイザーの一例（KEYENCE 製 SJ-G シリーズ）

### 3. 2 電極加熱による熱泳動を用いた微粒子付着の抑制方法

シースイア方式に代わる電極への微粒子析出（付着）の抑制方法として、熱泳動力を用いる方式を考案した。温度勾配のある場に微粒子が存在する場合、微粒子が低温側に向かう力を受け移動する現象を熱泳動といい、このとき微粒子が受ける低温側に向かう力を熱泳動力という<sup>3)</sup>。この方式は、電極先端部を加熱することによって、電極先端部から周囲の空間に向かう熱泳動力を発生させ、シロキサン微粒子の電極先端への析出を抑制し、製品ダメージのリスクが高い粒径に成長した粒子として再飛散するのを防止するものである。また、本方式については、イオナイザー電極へシロキサン微粒子が析出する現象が、クリーンルーム中のシリコンシーラントから発生したシロキサングスが電極近傍で粒子化してから、その後、電極へ付着することによって生じるものと仮定し、検討を進めている。

#### 3. 2. 1 微粒子付着の抑制に必要な温度勾配の概算

熱泳動力によってイオナイザー電極への微粒子付着を抑制するためには、その熱泳動力を得るための温度勾配を電極と周囲の空間との間に形成する必要がある。ここでは、その必要な温度勾配を、気相中での微粒子の沈着速度から概算して、電極への微粒子付着抑制の可能性を検討した。微粒子の沈着のメカニズムとしては、ブラウン拡散や重力沈降、今回検討する熱泳動力の他、電界の影響がある場合には静電気力が作用する。これら沈着力のうち、イオナイザー電極を加熱することで得られる熱泳動力が、沈着と逆方向に作用して微粒子付着が抑制されるモデル（図 3.5）を設定して概算を行う。しかし、実際のイオナイザー電極近傍における微粒子の挙動から各種沈着速度を導くには系が複雑なため、Liu ら<sup>4)</sup> が提唱した、垂直一方向流内で水平に置かれたウェハ表面への微粒子沈着のモデルにおける沈着速度の推定式を適用した。Liu らは、Sparrow<sup>5)</sup> らの行ったナフタリンを円板上から昇華させたときの物質移動の実験式をウェハ表面への微粒子沈着に適用しているが、以降多くの研究者によって研究が進められ、国内においても藤井ら<sup>6)</sup>、阪田ら<sup>7)</sup> によってその妥当性が実験的に示されている。また、各沈着機構の加算性については、江見ら<sup>8)</sup> によって、各沈着機構を加算した場合と、沈着機構間の相互作用を考慮して複数の機構を同時に考慮した場合について粒子の沈着速度を比較し、その差がさほ



ど大きくないことが示されている。そこで、本論文では、Liu らが提唱した微粒子の沈着速度  $V_T$  の理論式（式 3.1）に、ウェハを加熱することによる熱泳動速度  $V_{TM}$ <sup>9)</sup> を加算し、式 3.2 に示す、熱泳動力を考慮した沈着速度  $V_T$  とした。各の沈着機構による沈着速度はそれぞれ式 3.3～式 3.6 で表される。加算する熱泳速度  $V_{TM}$  は低温方向、つまり付着と逆方向に働くため負の符号が付いており、これが図 3.6 のようにブラウン拡散等の沈着速度を上回る場合に、微粒子付着が抑制される。このとき式 3.2 は  $V_T = V_{TM} + V_D + V_G + V_E < 0$  となり、この条件での熱泳動速度  $V_{TM}$  から必要な温度勾配  $\Delta T$  を求める。各式に用いる各係数や諸条件は以下のように与える。

$$V_T = V_D + V_G + V_E \quad (3.1)$$

$$V_T = V_{TM} + V_D + V_G + V_E \quad (3.2)$$

$V_{TM}$  : 熱泳動力による沈着速度 [m/s]

$V_D$  : ブラウン拡散による沈着速度 [m/s]

$V_G$  : 重力による沈着速度 [m/s]

$V_E$  : 静電気力による沈着速度 [m/s]

$$V_{TM} = -0.55\mu\Delta T / \rho_g T \quad (3.3)$$

$$V_D = 1.08(D/D_W)S_C^{1/3}R_e^{1/2} \quad (3.4)$$

$$V_G = C_C\rho_P D_P^2 g / 18\gamma \quad (3.5)$$

$$V_E = C_c F / 3\pi\mu D_P \quad (3.6)$$

$$F = \frac{\pi}{4} D_p^3 \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)}{\epsilon_r + 2} \cdot \text{grad} E_0^2 \quad (3.7)$$

$D$  : 拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]

$D_w$  : ウェハ直径 150 [mm]

$S_c$  : シュミット数 (=γ/D) [-]

$R_e$  : レイノルズ数 (=UD<sub>w</sub>/γ) [-]

γ : 空気の動粘度 1.56 × 10<sup>-5</sup> [m<sup>2</sup>/s]

$C_c$  : カニングガムの補正係数 [-]

$U$  : 垂直一方向流 0.35 [m/s]

$D_p$  : 粒子径 [m]

$F$  : グレーディエント力

$\epsilon_0$  : 真空の誘電率 8.85 × 10<sup>-12</sup> [F/m]

$\epsilon_r$  : SiO<sub>2</sub> 粒子の比誘電率 4.6 [-]

$E_0$  : 電極先端部の電界強度 [V/m]

μ : 空気の粘度 1.82 × 10<sup>-5</sup> [kg/m · s]

ρ<sub>p</sub> : 粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

ρ<sub>g</sub> : 空気の密度 1.197 [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  : 重力加速度 9.8 [m/s<sup>2</sup>]

ΔT : 温度勾配 [K/m]

$T$  : 空気の絶対温度 296 [K]

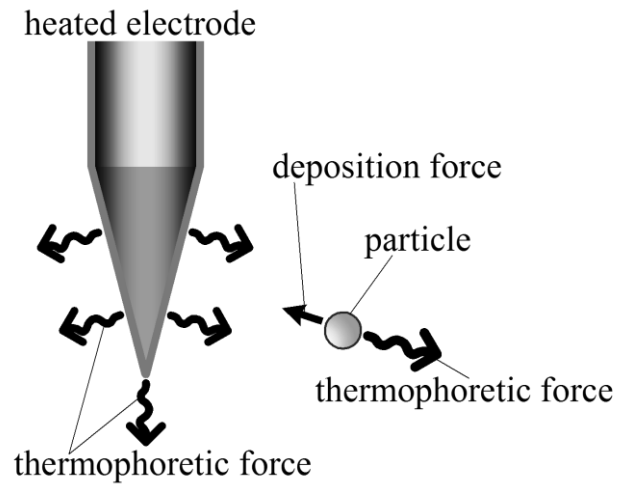


図 3.5 電極先端部における熱泳動力による微粒子付着の抑制（モデル）

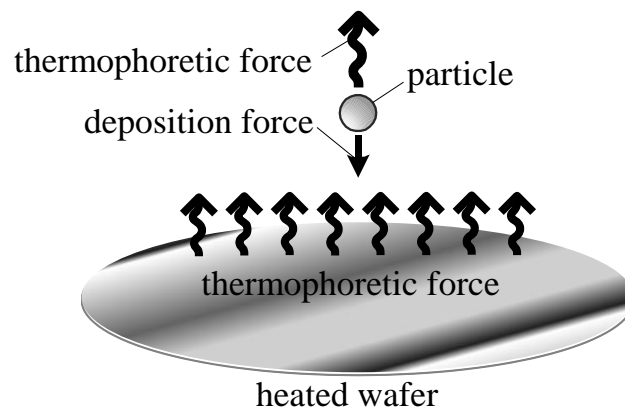


図 3.6 加熱ウェハ上での熱泳動力による微粒子付着の抑制（モデル）

対象とする粒子径は、 $0.001\mu\text{m}$  から  $0.1\mu\text{m}$  までの範囲とした。これは、「第2章」で述べたとおり、イオナイザー電極から発生する粒子の中心粒径が  $0.1\mu\text{m}$  以下であることに基づいている。また、ガスと微粒子の境界については明確には定義されていないが、 $1\text{nm}$  ( $0.001\mu\text{m}$ ) 未満は原子・分子領域に分類されるという大まかな境界が引かれている報告<sup>1,10)</sup>を参考とすれば、本検討においてはガスではなく粒子を対象とするため、下限の粒子径を  $0.001\mu\text{m}$  ( $1\text{nm}$ ) とした。さらに対象の粒子は無帯電粒子とした。これは、イオン場におけるエアロゾル粒子は Boltzmann 平衡電荷分布の状態<sup>11)</sup>で、そのほとんどが電荷を持たずに存在していることに基づいている。イオナイザーの放電電極近傍の電界中で無帯電粒子に作用する静電気力はグラデーディエント力  $F$  として式 3.7<sup>11)</sup>、電界強度  $E_0$  は印加電圧 AC7kV の交流式イオナイザーの放電電極が形成する電界強度として図 3.7<sup>12)</sup> の回転双曲面对平板モデルから式 3.8<sup>12)</sup> にて求め、微粒子に作用する静電気力による沈着速度  $V_E$  に適用した。これらの条件で  $0.001\mu\text{m}$  における各沈着速度を求めると、ブラウン拡散による沈着速度は  $V_D \doteq 3.1 \times 10^{-3} [\text{m/s}]$  となり、重力 ( $V_G$ ) と静電気力 ( $V_E$ ) による沈着速度はそれぞれ  $10^{-18} [\text{m/s}]$ 、 $10^{-9} [\text{m/s}]$  のオーダーとなることから、 $V_D$  に比べ  $V_G$  と  $V_E$  はその影響がほとんど無いことが判る。このとき、熱泳動力による沈着速度が他の沈着速度を上回る、 $V_T = V_{TM} + V_D + V_G + V_E < 0$  の条件で温度勾配  $\Delta T$  を概算すると、 $V_D \doteq 3.1 \times 10^{-3} < V_{TM}$  より、約  $100,000 [\text{K/m}]$  と求められる。同様に各粒子径における沈着速度を求め、温度勾配  $\Delta T$  を計算した結果を図 3.8 に示す。粒子径が  $0.001\mu\text{m}$  の微粒子が対象であれば、熱泳動力によって付着を阻むために必要な温度勾配  $\Delta T$  は約  $100,000 [\text{K/m}]$ 、粒子径が  $0.01\mu\text{m}$  以上の微粒子が対象であれば、必要な温度勾配  $\Delta T$  は約  $5,000 [\text{K/m}]$  以下となる。熱境界層の厚さが通常  $1\text{mm}$  以下<sup>13,14)</sup>であることを考慮すると、この結果から、イオナイザー電極を加熱して、周囲の空間との間に  $100^\circ\text{C}$  程度の温度差を形成することで、 $0.001\mu\text{m}$  以上の微粒子の付着を抑制できる可能性があると考えられる。

$$E = \frac{2fV}{\{f^2 - (d-x)^2\} \ln\{(f+d)/(f-d)\}} \quad (3.8)^{12)}$$

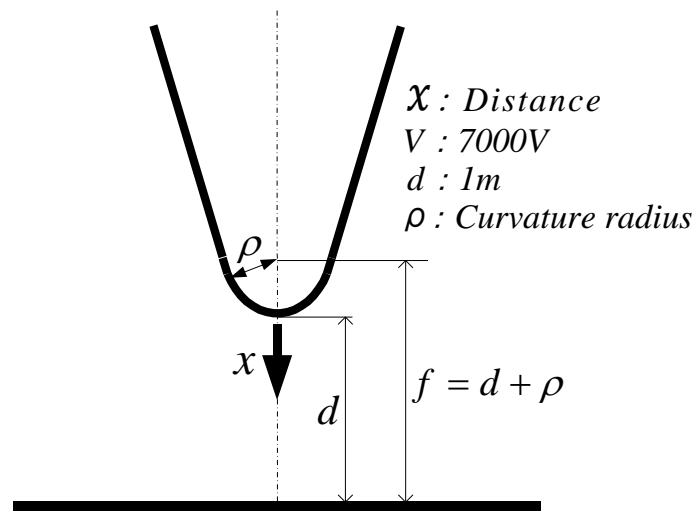


図 3.7 回転双曲面对平板モデル<sup>12)</sup>

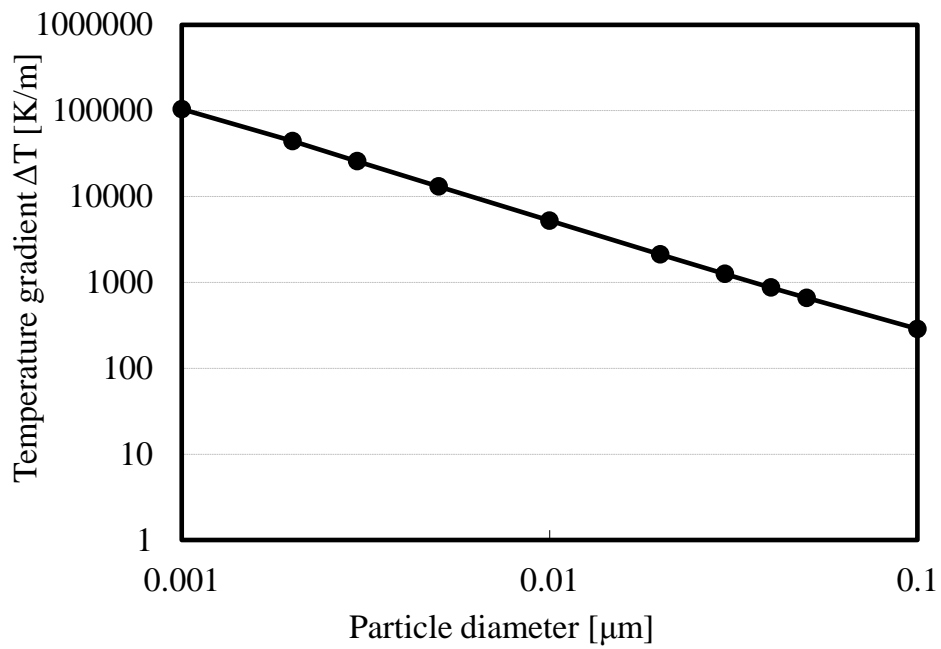


図 3.8 微粒子付着抑制に必要な温度勾配の概算結果

### 3. 2. 2 微粒子付着抑制効果の確認実験

#### (1) 実験概要および方法

微粒子付着抑制に必要な温度勾配の概算結果から、電極を加熱することで微粒子の付着を抑制できる可能性が示唆されたので、実際のイオナイザーを用いて微粒子付着の抑制効果の確認実験を行った。実験装置の概略を図 3.9 に示す。実験に用いたイオナイザーは交流式（パルス AC タイプ）で、電極への印加電圧は AC7kV、交番の周波数は 33Hz、電極の直径は  $\phi$  2mm である。このイオナイザーを 2 台用い、一方の電極を加熱し（イオナイザー A）、もう一方を加熱無し（イオナイザー B）の状態ですべて一定時間運転し、運転後の電極先端部の異物の付着状況を実体顕微鏡（KEYENCE 製 VXH-1000）にて観察して比較した。イオナイザー A の電極の加熱温度は、温度勾配の概算結果が  $0.001\mu\text{m}$  以上の粒子では  $100^{\circ}\text{C}$  前後であったことと、イオナイザーの樹脂部分の耐熱温度が  $100^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$  であることから、 $90^{\circ}\text{C}$  程度を目標とし、ニクロム線を用いて加熱を行った。電極の先端から 3~4mm 上部（先端テーパ部から円柱状になった部分）にニクロム線を数回巻き付け、電極の温度が目標の  $90^{\circ}\text{C}$  となるように、絶縁トランスの直流電圧をスライダックで調整しながら印加して加熱した。電極の温度は、ニクロム線を巻き付けた部分（加熱部）を T 型熱電対にて、電極先端の直近部分（先端部から 1mm 以内）を極細型の K 型熱電対（線径  $\phi$   $80\mu\text{m}$ ）にて測定した。電極の温度測定の詳細を図 3.10 に示す。電極の先端部が直径約  $50\mu\text{m}$  と極めて微細で、ニクロム線の巻き付けや熱電対の取り付けが困難なため、この方法で加熱および温度測定を行っている。なお、実際の電極先端部分の温度が上記の理由で測定できないため、ニクロム線を巻き付けた加熱部を  $90^{\circ}\text{C}$  とした時の電極先端部分の温度について、数値シミュレーションによる確認を行った。シミュレーション計算対象の電極、およびイオナイザー筐体の形状は実物と同様とし、イオナイザー筐体の上部から  $23^{\circ}\text{C}$ 、 $0.3\text{m/s}$  の層流条件で給気し、下部から排気する条件で計算を行った。また、一連の実験は、先ずイオナイザー A の電極の温度が目標の  $90^{\circ}\text{C}$  となるよう絶縁トランスの出力電圧を設定し、その後、熱電対を取り外した状態でイオナイザー A、B の 2 台を同時に運転し、異物付着量の比較を行う手順とした。温度測定用の熱電対の取り付け位置が電極先端直近のため、熱電対が異物の付着状況に影響することを防ぐためである。

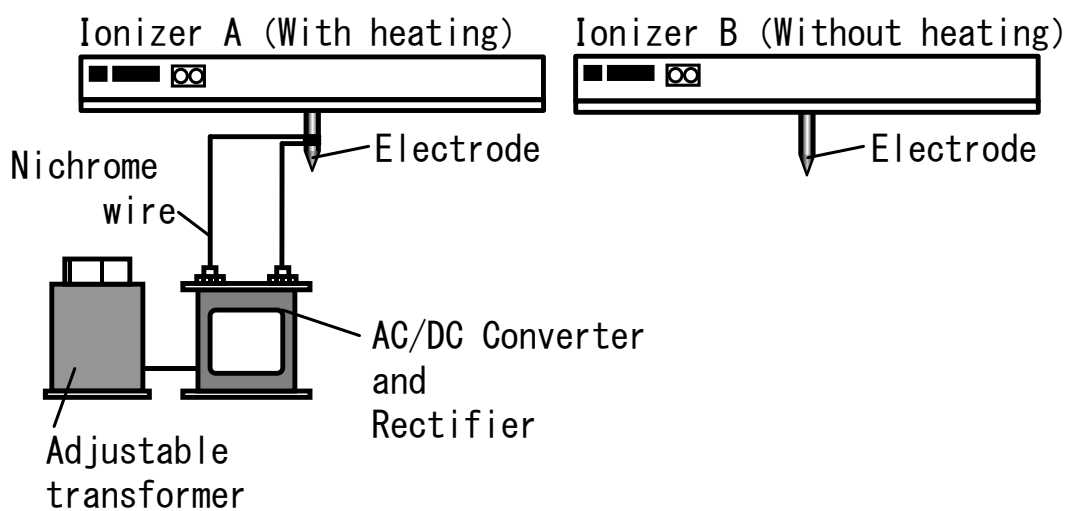


図 3.9 微粒子付着抑制効果の確認実験装置

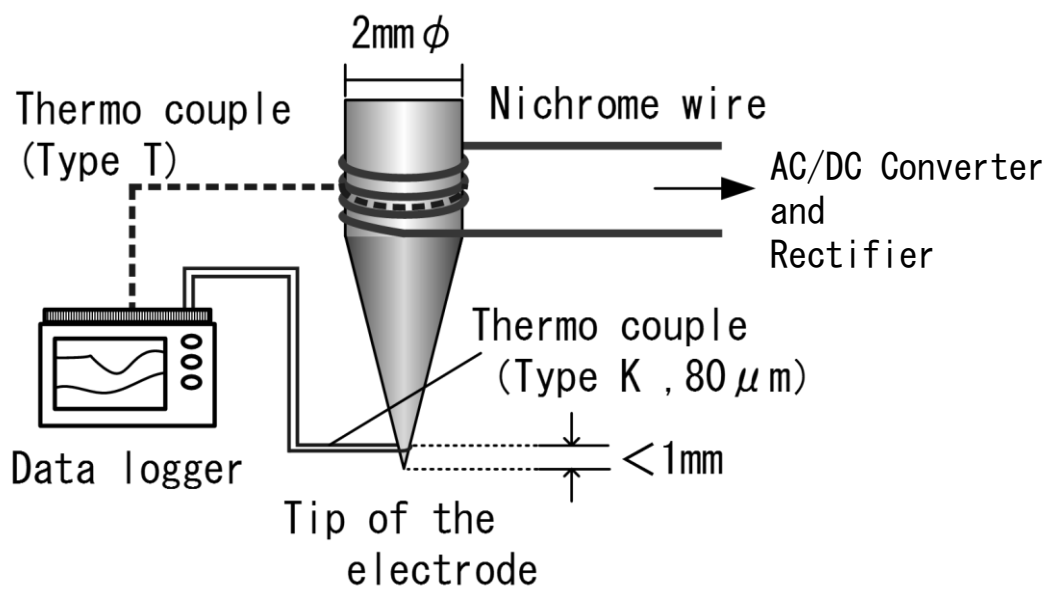


図 3.10 電極先端部の詳細（加熱部、温度測定部）

## (2) 実験結果

ニクロム線を巻き付けた加熱部を  $90^{\circ}\text{C}$  とした時の K 型熱電対による電極先端の直近部分（先端部から  $1\text{mm}$  以内）の温度測定結果を図 3.11 に、電極先端部分の温度のシミュレーション結果を図 3.12 に示す。ニクロム線を巻き付けた加熱部が約  $90^{\circ}\text{C}$  の場合、図 3.11 に示すように電極先端の直近部分の温度は平均で  $87^{\circ}\text{C}\sim 88^{\circ}\text{C}$  の間を推移していた。一方、図 3.12 のシミュレーション結果では、ニクロム線を巻き付けた加熱部を  $90^{\circ}\text{C}$  に加熱した場合、先端部は約  $88.0^{\circ}\text{C}\sim 88.2^{\circ}\text{C}$  となった。これらの結果から、ニクロム線によって電極先端から  $3\sim 4\text{mm}$  上部を  $90^{\circ}\text{C}$  に加熱した場合、実際の電極先端部分の温度としては  $87^{\circ}\text{C}\sim 88^{\circ}\text{C}$  程度になっていると思われ、ほぼ目標の  $90^{\circ}\text{C}$  に加熱できていることが判った。

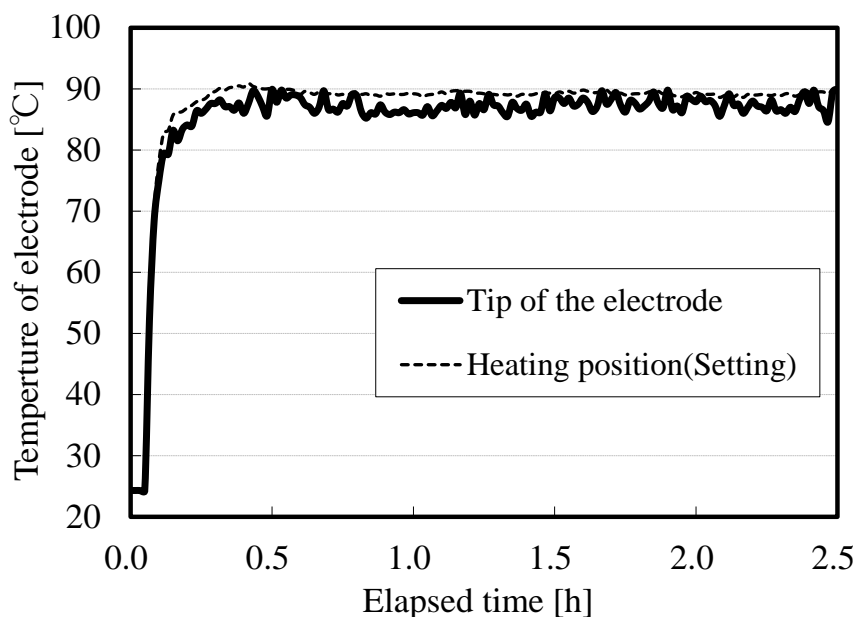


図 3.11 熱電対による電極の温度測定結果



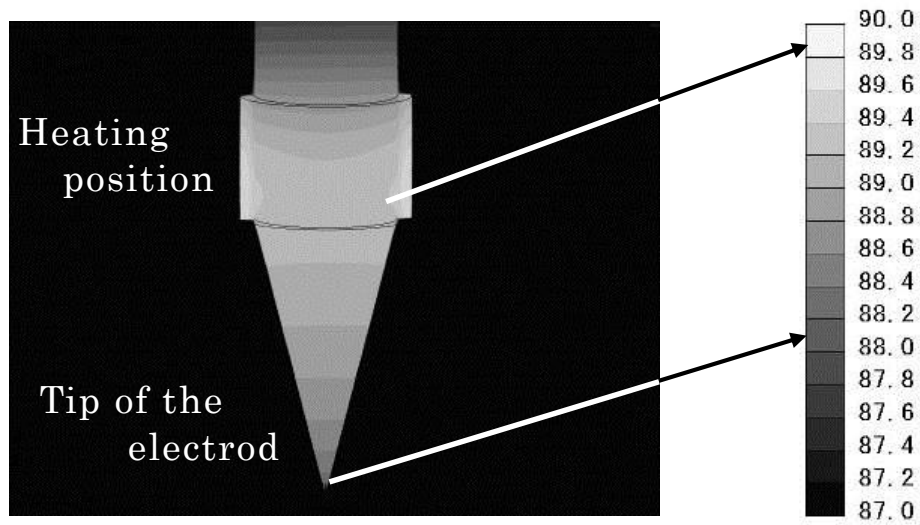
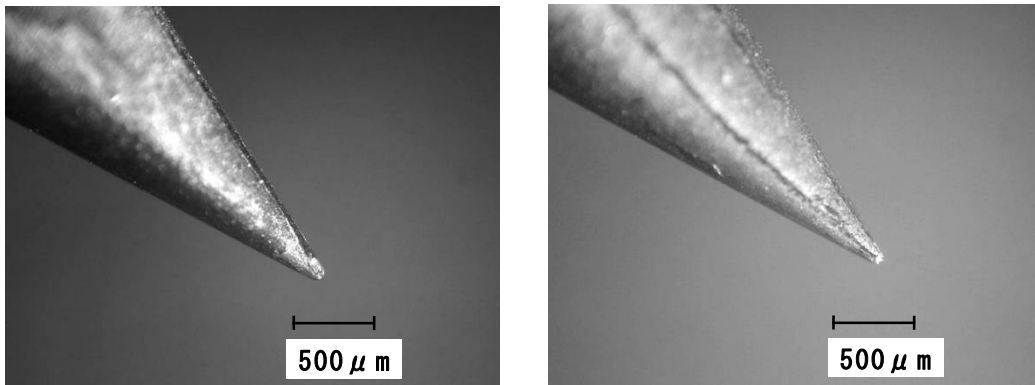


図 3.12 電極先端部温度のシミュレーション結果

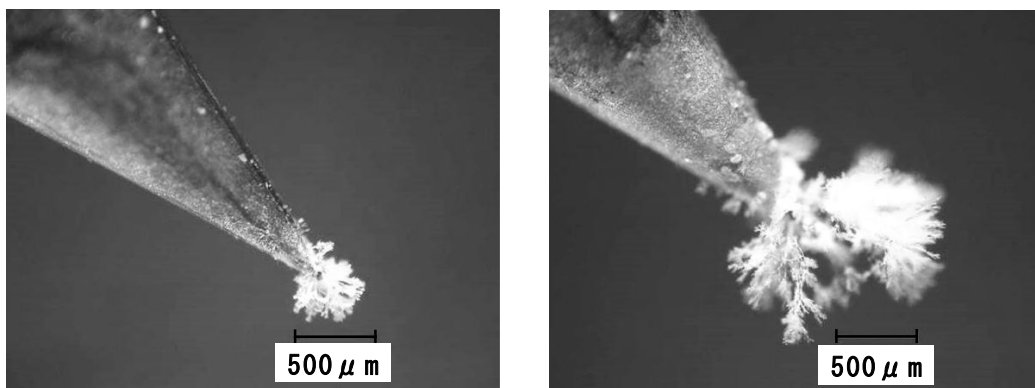
次に、イオナイザーAとイオナイザーBの異物の付着状況の比較を示す。初期状態の実態顕微鏡写真を図 3.13 に、約 800hr（33 日間）運転後の実態顕微鏡写真を図 3.14 に示す。図 3.14 から、イオナイザーAとイオナイザーBのどちらの電極先端部にもシロキサンが粒子化した  $\text{SiO}_2$  と思われる、白い結晶状の異物が見られるが、付着量を比較すると明らかにイオナイザーAの電極の付着量が少ない結果となった。この評価においては、定量し得るのに十分な付着量ではなく、採取・計量できないため、実態顕微鏡写真を用いた目視による定性評価としている。なお、繰り返し実験での付着量比較についても、加熱無し>加熱有りという同様の傾向を確認している。この結果から、電極を  $90^\circ\text{C}$  程度に加熱する実験においても、熱泳動力によって微粒子の付着を低減できる可能性が示唆された。



イオナイザーA

イオナイザーB

図 3.13 電極先端部実態顕微鏡写真（初期状態）



イオナイザーA（加熱有り）

イオナイザーB（加熱無し）

図 3.14 電極先端部実態顕微鏡写真（約 800 時間運転後）

### 3. 2. 3 様々な抵抗体の抵抗加熱による自己発熱型電極の発熱実験

#### (1) 自己発熱型電極の発熱原理

イオナイザー電極を加熱する手段としては様々な方法が考えられるが、前述の実験のように、ニクロム線等の電熱線を直接電極に巻き付けて加熱する方法は、実用上では幾つか問題がある。実際のイオナイザーには通常数十本の電極が備わっており、その全てを加熱するための加熱電力（電源）と、電極への電熱線の巻き付け加工が必要となり、大幅なコスト増が予想される。また、電極と電熱線の系統が物理的に繋がるため、放電電流が電熱線系統にリークする恐れもある。そこで、電極に抵抗体を組み込み、イオナイザーから供給された電流がその抵抗体を流れることで発生するジュール加熱によって電極を加熱する、自己発熱型の電極を考案した。図 3.15 に自己発熱型電極の構造を示す。イオナイザーの電圧を印加する電圧印加部とコロナ放電発生部には、従来 of 電極材としても用いられるタングステンを用い、その間に抵抗体を挟み込んだ構造になっている。これにより、加熱用の電源等を付加すること無く電極を加熱することが可能で、実際のイオナイザーを想定した場合に、構造面、コスト面で有利であると考えられる。また、一般に、抵抗体を流れる電流で発生するジュール加熱の熱量は式 3.9<sup>15)</sup> で表され、電流  $I$  と抵抗  $R$  がそれぞれ大きいほど発生する熱量は大きくなる。電極に組み込む抵抗体の抵抗値を調整することで、電極の発熱温度を制御できると考えられる。

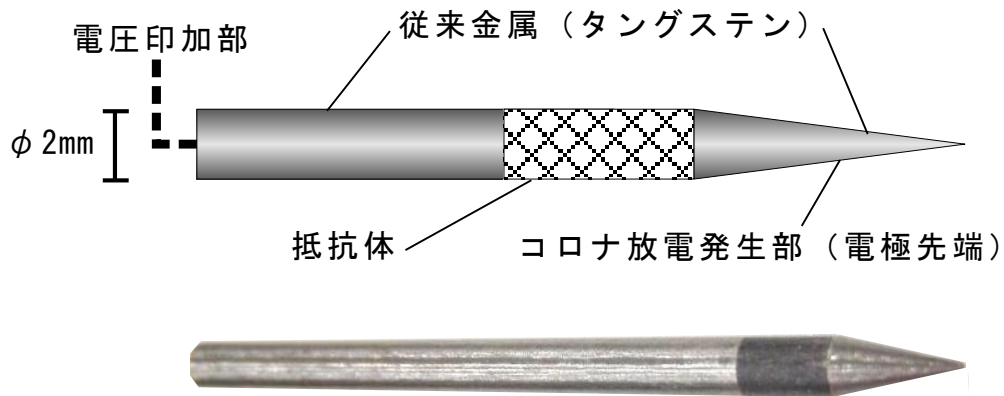


図 3.15 抵抗体のジュール加熱を用いた自己発熱型電極の構造

$$Q = I^2 R t = W t \quad (3.9)^{15)}$$

$Q$  : 熱量[J]

$I$  : 電流[A]

$R$  : 抵抗[ $\Omega$ ]

$t$  : 時間[s]

$W$  : 電力[J/s]

## (2) イオナイザーを用いた自己発熱型電極の発熱実験

数種類の自己発熱型電極のサンプルを作成し、ACタイプのイオナイザーの電圧印加により発熱が得られるか評価実験を行った。実験装置の概略を図3.16に示す。ACタイプのイオナイザー（SIMCO-ION製 MP5625）の周波数を15kHz（固定）、印加電圧を $\pm 4\sim 6\text{kV}$ （イオナイザー設定 $\pm 5\text{kV}$ ）とし、自己発熱型電極のサンプルに電圧を印加したときの電極の温度を測定した。電極の温度は、電極先端の直近部分（先端部から1mm以内）に極細型のK型熱電対（線径 $\phi 80\mu\text{m}$ ）を巻き付けて測定した。また、電極の抵抗値の測定にはエレクトロメータ（ADVANTEST製 R8252）を用いた。

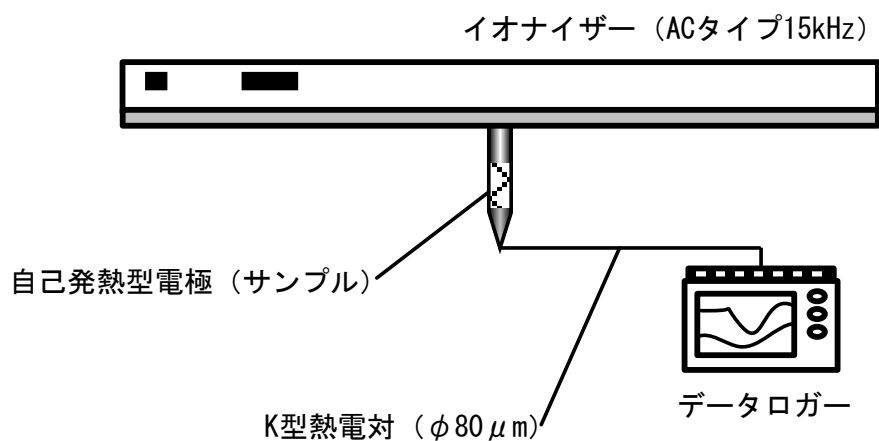


図 3.16 自己発熱型電極サンプルの発熱温度測定実験装置

表 3.1 に 5 種類の自己発熱型電極サンプルについてその諸元、およびイオナイザーの印加電圧を $\pm 4 \sim 6 \text{ kV}$ （イオナイザー設定 $\pm 5 \text{ kV}$ ）として通電したときの 1hr 後の電極の温度測定結果を示す。なお、電極の初期状態の温度は約  $22^\circ\text{C}$  であった。表 3.1 から、サンプル No. 1（抵抗体： $\text{ZrO}_2$ ）、No. 2（抵抗体：ABS 樹脂）の通電の電極温度は  $32^\circ\text{C} \sim 33^\circ\text{C}$  で、初期温度約  $22^\circ\text{C}$  からの温度上昇幅は  $10^\circ\text{C}$  前後であった。No. 1、No. 2 は抵抗値が大きな（ $10^{12} \sim 10^{13} \Omega$ ）絶縁体であるため、イオナイザーから供給される電流が電極を流れず、発熱しなかったと考えられる。また、電流が流れ難いのでコロナ放電も非常に不安定であった。一方、抵抗体に SiC を用いた No. 3、No. 4、No. 5 の場合、 $86^\circ\text{C} \sim 160^\circ\text{C}$  程度まで温度が上昇した。抵抗値が No. 1、No. 2 に比べ低く（ $10^5 \sim 10^8 \Omega$ ）、十分な電流が電極を流れたことを示しており、安定したコロナ放電を確認した。

次に、表 3.2 に示す、発熱が確認された No. 3、No. 4、No. 5 の SiC を用いた電極サンプルについて、電極温度と抵抗値の関係を図 3.17 に示す。図 3.17 から、電極温度と抵抗値との間には良好な相関が見られ、抵抗値が大きいほど高い発熱温度が得られた。この関係から導かれた関係式 3.10 を用いることで、今回の実験に用いたイオナイザーの印加電圧において、SiC を組み込んだ自己発熱型電極の発熱温度を任意に制御することが概ね可能である。式 3.10 より、必要な発熱温度から電極の抵抗値（実際にはほぼ SiC 部分の抵抗値）を求め、次に式 3.11<sup>16)</sup> に示す抵抗体の抵抗率  $\rho$  と長さ  $l$ 、断面積  $S$  の関係から組み込む SiC の形状（体積）を決定することができる。一例として、図 3.18 に示すような形状の電極を想定すると、イオナイザーの電極挿入部分から電極の直径を決定し、任意の抵抗率の SiC を選択すれば、SiC 部分の長さのみを調整することで発熱温度を制御することが可能となる。ただし、今回の実験で用いたイオナイザーで安定したコロナ放電と発熱を得るためには、SiC を組み込んだ自己発熱電極の抵抗値は  $10^5 \sim 10^8 \Omega$  程度が適当である。

表 3.1 自己発熱型電極サンプルの諸元と発熱温度

サンプル	抵抗体	抵抗値* <sup>1)</sup>	電極温度* <sup>2)</sup>
 No. 1	ZrO <sub>2</sub>	1.5 × 10 <sup>13</sup> Ω	32.3 °C
 No. 2	ABS	3.5 × 10 <sup>12</sup> Ω	33.2 °C
 No. 3	SiC	3.8 × 10 <sup>5</sup> Ω	86.7 °C
 No. 4	SiC	1.4 × 10 <sup>7</sup> Ω	134.2 °C
 No. 5	SiC	1.5 × 10 <sup>8</sup> Ω	158.3 °C

※1) 抵抗測定時の印加電圧：200V  
 ※2) 室温・電極初期温度：約 22°C  
 ※3) イオナイザー印加電圧：±4～6kV AC

表 3.2 サンプル No. 3、No. 4、No. 5 (SiC) の発熱温度

サンプル	抵抗値 * <sup>1)</sup>	電極温度 * <sup>2)</sup>
 No. 3	3.8 × 10 <sup>5</sup> Ω	86.7 °C
 No. 4	1.4 × 10 <sup>7</sup> Ω	134.2 °C
 No. 5	1.5 × 10 <sup>8</sup> Ω	158.3 °C

※1) 抵抗測定時の印加電圧：200V  
 ※2) 室温・電極初期温度：約 22°C  
 ※3) イオナイザー印加電圧：±4～6kV AC

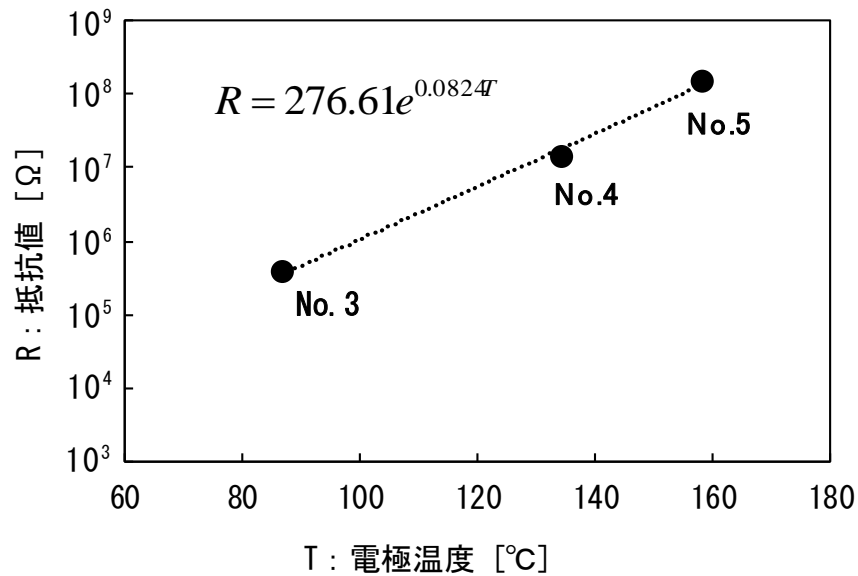


図 3.17 電極サンプル (No. 3、No. 4、No. 5) における電極温度と抵抗値の関係

$$R = 276.61e^{0.0824T} \quad (3.10)$$

$R$  : 抵抗値 [Ω]

$T$  : 温度 [°C]

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.11) \quad ^{16)}$$

$\rho$  : 抵抗率 [Ω · m]

$l$  : 抵抗体の長さ [m]

$S$  : 抵抗体の断面積 [m<sup>2</sup>] SiC

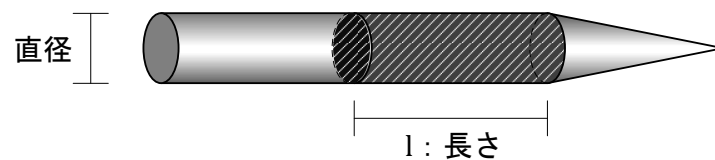


図 3.18 SiC を組み込んだ自己発熱型電極の形状 (一例)



### 3. 2. 4 SiCを組み込んだ自己発熱型電極の発熱特性

#### (1) SiCを組み込んだ自己発熱型電極の周波数、電圧依存

SiCを組み込んだ自己発熱型電極について、印加する交流電圧の周波数や電圧が発熱に与える影響について調査した。図 3.19 に実験装置の概略を示す。電極に、波形発生機付き交流高圧電源（Trek 社製 Model 10/10B および Model 20/20C）を用いて交流電圧を印加したときの電極の温度上昇を測定した。電極の温度は、極細型の K 型熱電対（線径  $\phi 80 \mu\text{m}$ ）を電極先端部近傍に巻き付けて測定した。交流の周波数は 15kHz、1.5kHz、150Hz とし、印加電圧は  $\pm 5\text{kV}$  と  $\pm 2.5\text{kV}$  とした（15kHz の  $\pm 5\text{kV}$  のみ Model 20/20C を使用）。また、測定に用いた電極の抵抗値は、 $1.2 \times 10^7 \Omega$  であった。

図 3.20～図 3.22 に周波数ごとの電極の温度変化を示す。周波数 15kHz で電圧を印加した場合は、電極の温度が上昇し、印加電圧が高い方が電極温度も高い結果となった。周波数 1.5kHz の場合も同様の傾向を示すが、周波数 15kHz よりは温度上昇は小さい結果となった。周波数 150Hz については印加電圧によらず温度上昇は見られなかった。これらの結果から、今回検討した抵抗値  $1.2 \times 10^7 \Omega$  の SiC を組み込んだ自己発熱型電極で発熱を得るためには、周波数は数 kHz 以上で高い方が、印加電圧も高い方が有利であることがわかる。

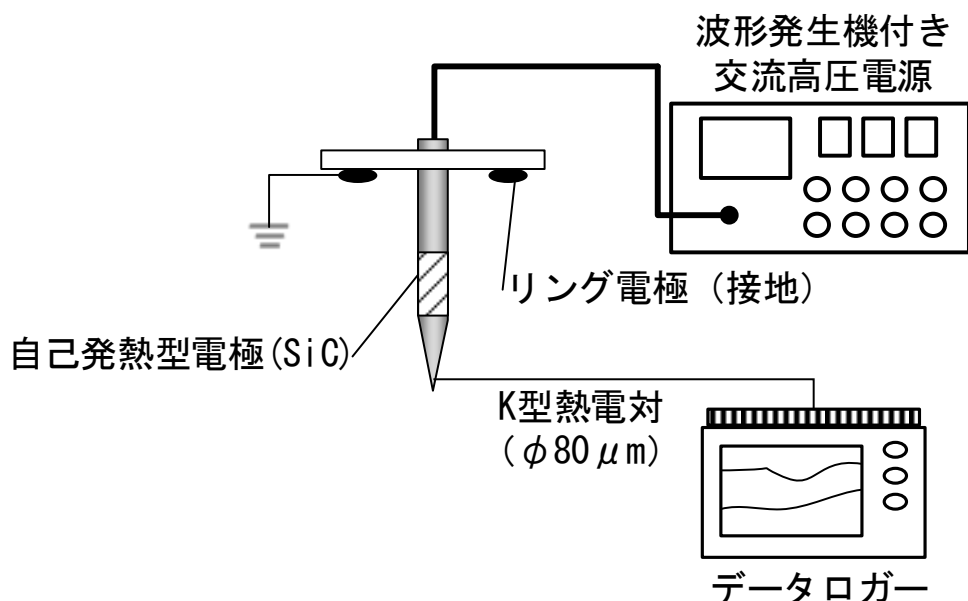


図 3.19 SiC を組み込んだ自己発熱型電極の発熱特性実験装置

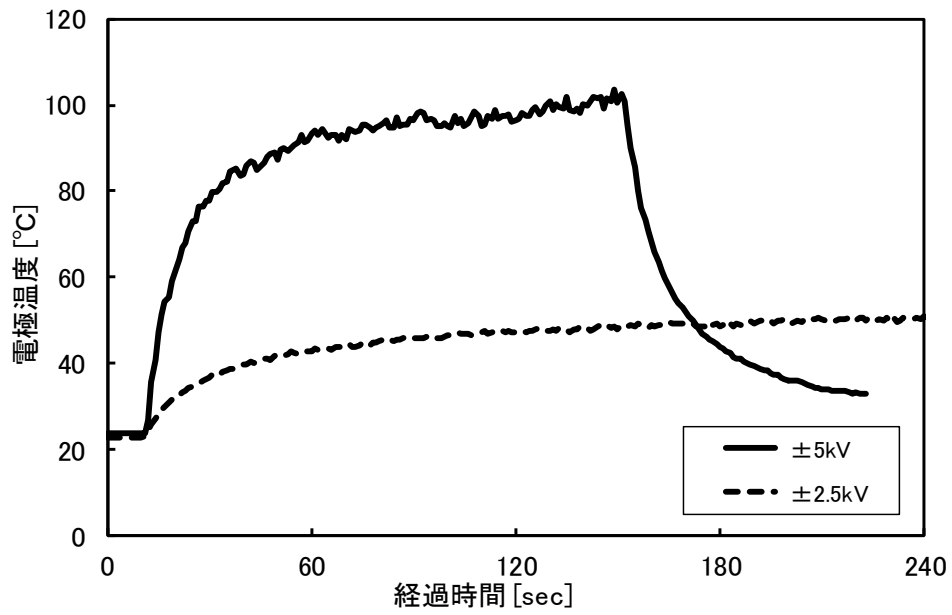


図 3.20 印加電圧による電極の発熱特性（周波数：15kHz）

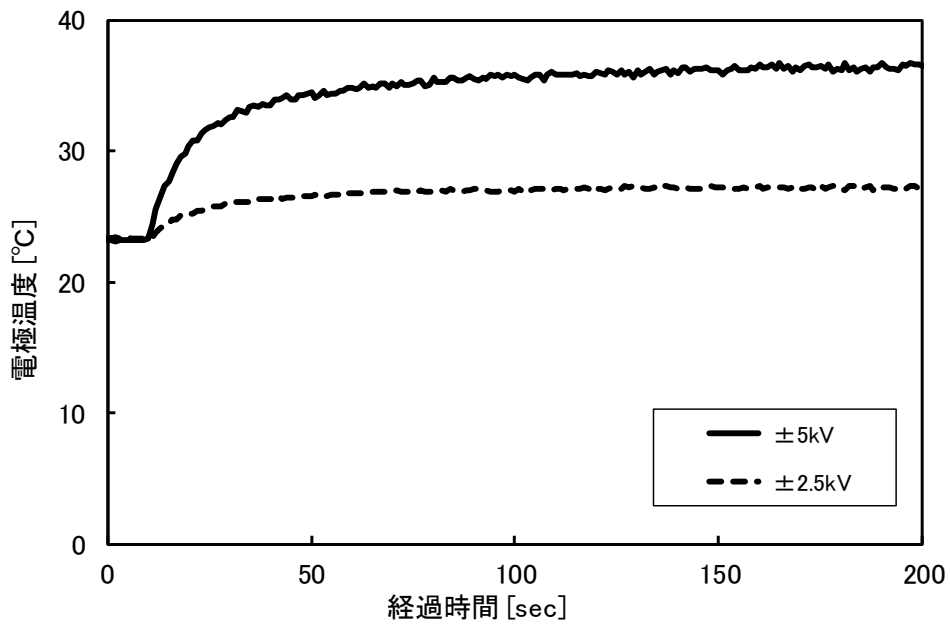


図 3.21 印加電圧による電極の発熱特性（周波数：1.5kHz）

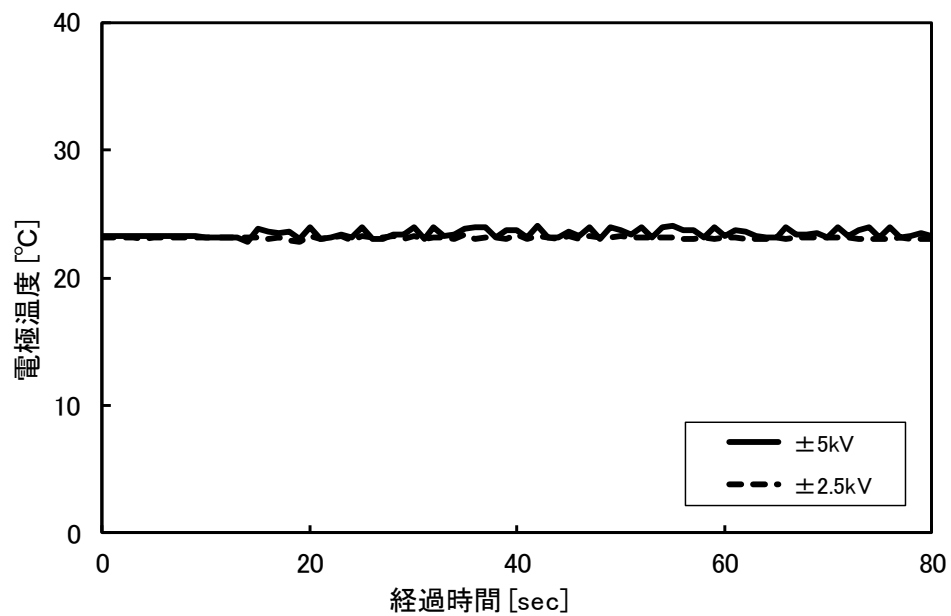


図 3.22 印加電圧による電極の発熱特性（周波数：150Hz）

## (2) SiCを組み込んだ自己発熱型電極の発熱に寄与する電流値の概算

次に、SiCを組み込んだ自己発熱型電極の発熱に寄与する電流値を概算した。そこでまず、電極が発熱する際の熱量からその電流値を算出した。電極に、イオナイザーで電圧を印加（15kHz、±4～6kV）したときの温度変化の測定装置を図 3.23 に、その温度変化を図 3.24 に示す。イオナイザーに電極を取り付け、電極先端部の温度を極細型の K 型熱電対（線径  $\phi 80 \mu\text{m}$ ）にて測定した。なお、測定に用いた電極の抵抗値は、 $1.2 \times 10^7 \Omega$ であった。図 3.24 から、電圧印加開始から約 1 分以内で電極は最高温度約  $120^\circ\text{C}$  に達した。ここから、電極の温度が上昇する際の熱量を求め、発熱に使われた電流値を概算する。熱量の算出には、式 3.12<sup>17)</sup> を、電流値の算出には前述の式 3.9 ( $Q=I^2R=W$ ) を用いた。また、熱量の算出に用いる諸条件<sup>18)</sup> は表 3.3 に示す通りとした。温度上昇の熱量（エネルギー）を求めるには、放射による熱損失を考慮して、物体の温度上昇のみに熱エネルギーが消費される条件にて計算を行う方がわかり易い。そこで、Stefan-Boltzmann の法則より、放射によるエネルギーは温度の 4 乗に比例し、温度が高くなるほど放射エネルギーは増大する<sup>19), 20)</sup> ので、熱放射の影響が少ない低温側のデータを用いて算出する。ここでは、図 3.24 中の温度上昇開始（電圧印加開始）から 5 秒間とした。式 3.12 から、5 秒間の熱量は、約  $2.6[\text{J}]$  と求められ、1 秒間あたりの熱量としては  $2.6[\text{J}] \div 5[\text{sec}]$  で約  $0.51[\text{W}]$  となる。ここで、前述の式 3.9 より電流値を算出すると、およそ  $I=210 \mu\text{A}$  と求められた。

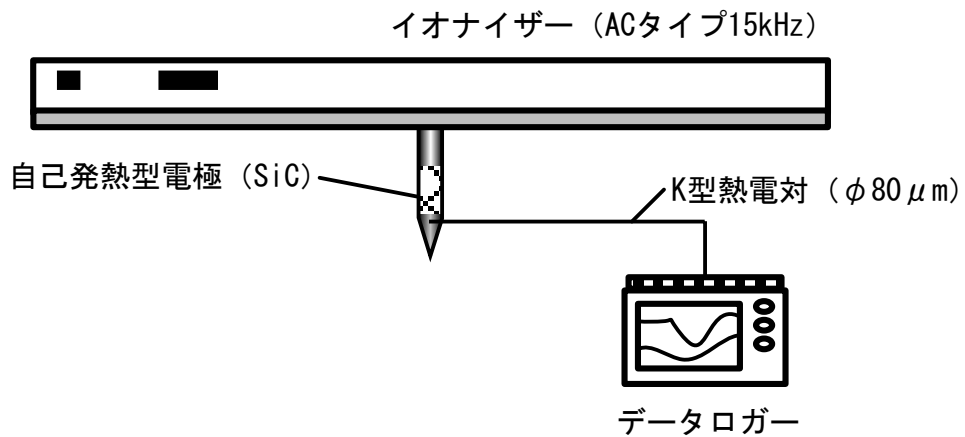


図 3.23 SiC を組み込んだ自己発熱型電極の温度上昇測定装置の概略

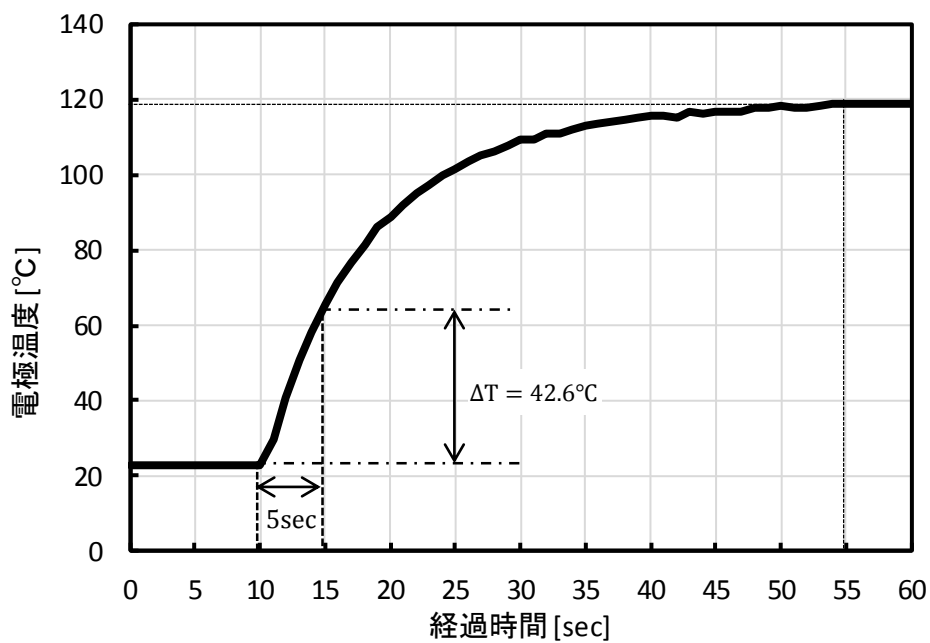


図 3.24 電極の温度上昇 (イオナイザーでの電圧印加)

$$Q = C_p \rho_s V \Delta T \quad (3.12)^{17)}$$

$Q$  : 熱量 [J]

$C_p$  : 比熱 [J/(g · K)]

$\rho_s$  : 密度 [g/cm<sup>3</sup>]

$V$  : 抵抗体の体積 [cm<sup>3</sup>]

$\Delta T$  : 温度差 [K (°C) ]

表 3.3 SiC の物性などの諸条件<sup>18)</sup>

$C_p$	比熱	J / (g · K )	0.67
$\rho_s$	見掛密度	g /cm <sup>3</sup>	3.2
$V$	SiC部分の体積	cm <sup>3</sup>	0.0271
$\Delta T$	温度上昇	開始 : 22.8°C	K (°C)
		5秒後 : 65.4°C	

次に、イオナイザーから供給される電流値から、発熱に寄与した電流値を概算した。はじめに、イオナイザーから電極への電圧印加によって、電極に供給される電流値を求めた。図 3.25 にイオナイザーから供給される電流値の測定方法を示す。イオナイザーの電極挿入部から電極までを電線で接続し、その間に既知の抵抗 ( $1\text{M}\Omega$ ) を挿入して抵抗前後の電圧から電流値を算出した。抵抗前後の電圧は、高電圧プローブ (Tectronix 製 P6015A、内部抵抗:  $100\text{M}\Omega$ ) を介してオシロスコープ (Tectronix 製 DS2014) によって測定した。図 3.26 に抵抗前後の電圧の測定値と、その電圧差から算出した電流値を示す。イオナイザーから供給されるトータルの電流値を  $i_t$  とすると、その最大値は約  $2000\ \mu\text{A}$  であることが読み取れる。ここから実効値としては、 $2000\ \mu\text{A (MAX)} \times 1/\sqrt{2}$  より、およそ  $i_t = 1400\ \mu\text{A}$  と求められる。

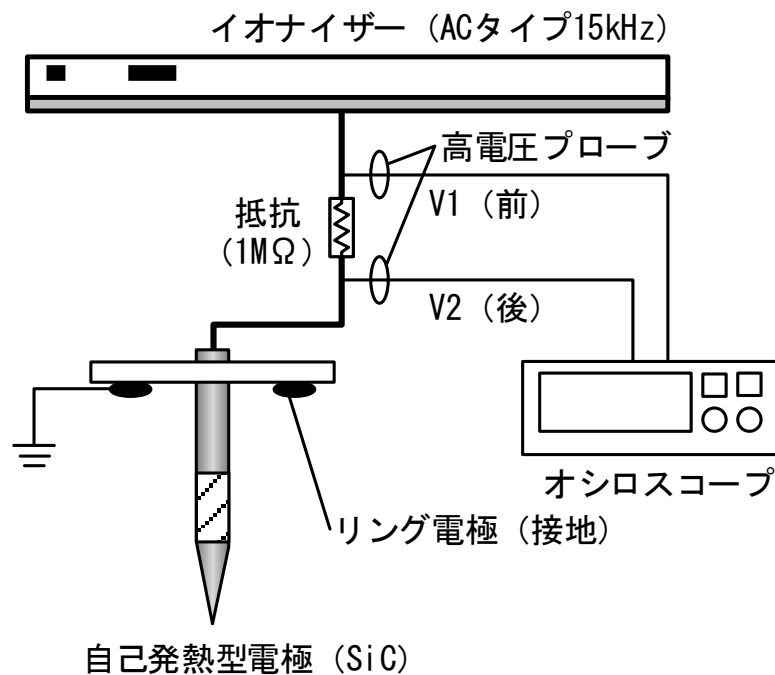


図 3.25 イオナイザーから電極に供給される電流値の測定

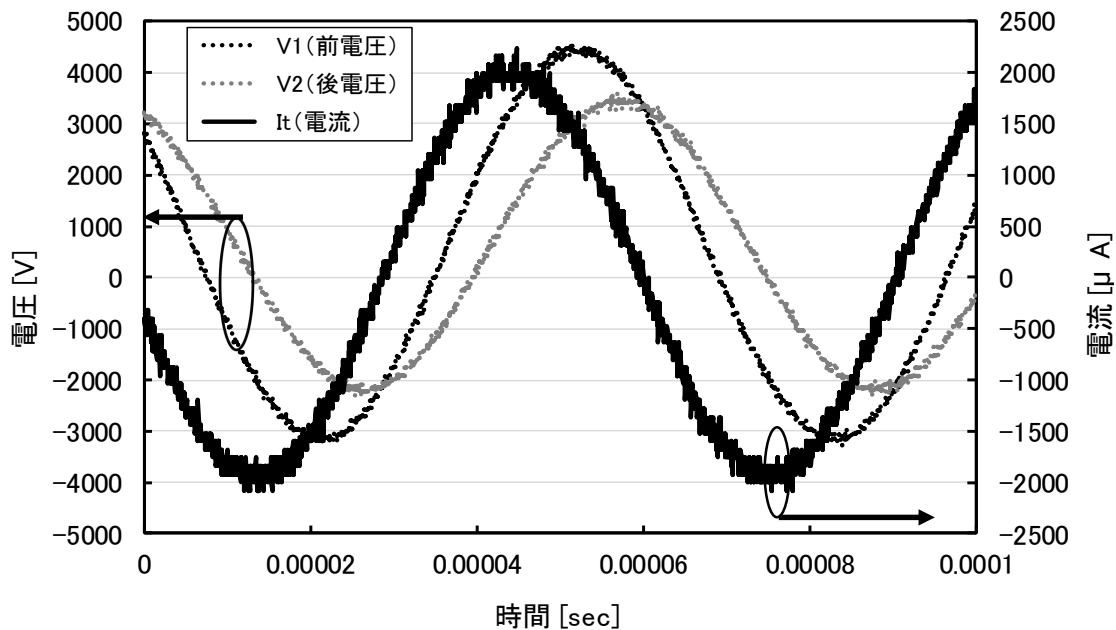


図 3.26 イオナイザーから供給される電流値（計算値）

ここで求めた  $i_t = 1400 \mu A$  の電流には、電極全体が近傍のリング電極（接地極）との間に形成するコンデンサへの充放電に寄与する電流（ $i_c$ とする）と、電極先端からコロナ放電によって正負イオンとして放出される電流（ $i_D$ とする）が含まれると考えられる。そこで電極先端からコロナ放電によってイオンとして放出される電流（ $i_D$ ）を求めるために、電極の先端部を樹脂でモールドし、コロナ放電が発生しない状態にて電極の温度上昇を測定した。図 3.27 に測定装置の概要を、図 3.28 に測定結果を示す。図 3.28 から、コロナ放電が発生していない状態でも、コロナ放電が発生している状態とほぼ同様の温度上昇を確認した。このとき、前項同様に温度上昇開始（電圧印加開始）から 5 秒間の熱量を求めると、約  $2.3 [J]$  となり、1 秒間あたりの熱量としては  $2.3 [J] \div 5 [sec]$  で約  $0.46 [W]$  となる。式 3.9 から電流値は、およそ  $I = 196 \mu A$  と求められる。前項で求めた、コロナ放電が発生している状態の電流値がおよそ  $210 \mu A$  であるので、その差の  $14 \mu A$  がコロナ放電によってイオンとして放出された電流値（ $i_D$ ）と考えられる。また、 $i_t$  から  $i_D$  を差し引いた  $1386 \mu A$  が、電極がリング電極と形成するコンデンサへの充放電電流（ $i_c$ ）と考えることができる（図 3.29）。



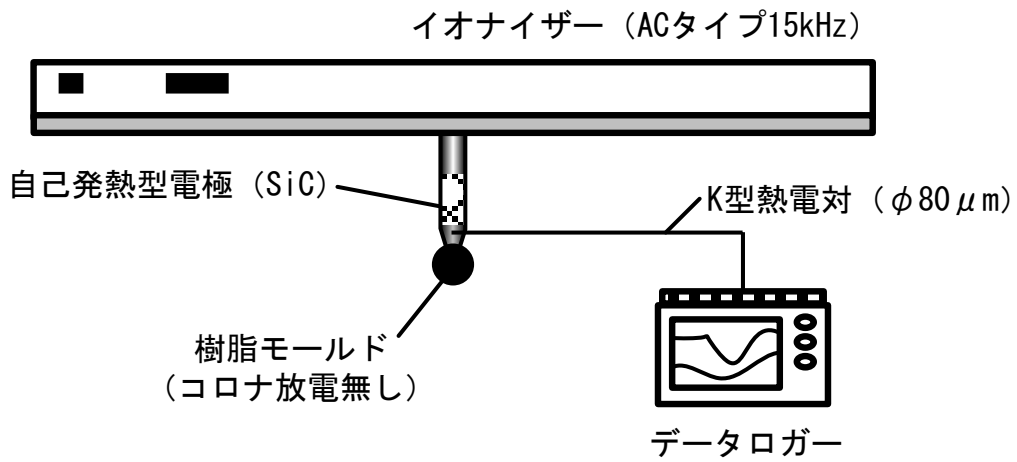


図 3.27 電極の発熱温度測定 (コロナ放電無し)

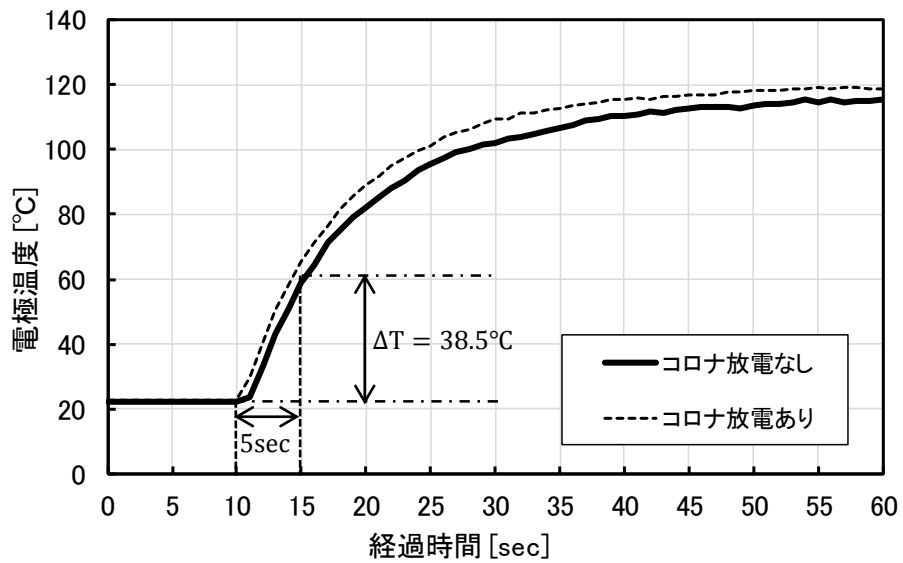


図 3.28 電極の温度上昇 (コロナ放電無し)

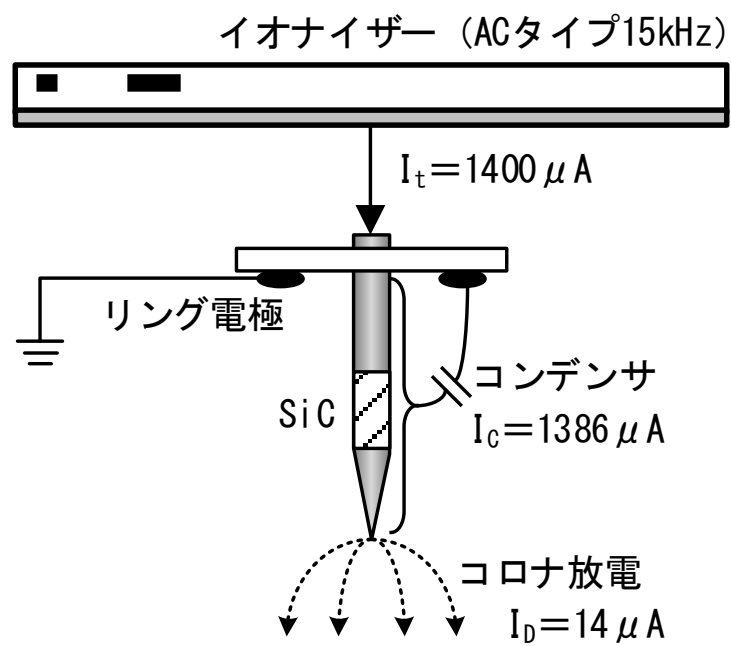


図 3.29 イオナイザーから電極に供給される電流の内訳

次に、電極全体がリング電極と形成するコンデンサへの充放電電流 ( $i_c$ ) のうち、実際に発熱に寄与すると考えられる、SiC 部分の充放電電流の概算を試みた。SiC 部分の充放電にかかる電流を  $i_s$  とすると、電極全体の充放電の電流 ( $i_c$ ) に占める、SiC 部分の充放電電流 ( $i_s$ ) の割合は、電極全体のリング電極間のコンデンサの静電容量を  $C_t$ 、SiC 部分のリング電極間のコンデンサの静電容量を  $C_s$  とすれば、それぞれの静電容量の割合と等しいので、 $i_s/i_c=C_s/C_t$  と考えることができる。そこで、図 3.30、図 3.31 に示すように、電極全体を 2mm ごとのブロックに分割し、各ブロックのリング電極間コンデンサの静電容量を求め、全体に占める SiC 部分の割合を概算した。簡易的に、各ブロックのリング電極間コンデンサを平行平板に置き換えて、リング電極との距離以外の条件を同一とすれば、式 3.13、式 3.14<sup>21)</sup> に示すように、静電容量は距離の逆数に比例するので、各ブロックの静電容量は、係数を  $C$  と置き、 $C$  とリング電極からの距離の逆数との積で扱うことができる。表 3.4 に、各ブロックのリング電極間コンデンサの静電容量を示す。なお、図 3.30 に示す電極支持用の絶縁板は PTFE 製なので絶縁板を介する部分の静電容量は、比誘電率を 2.0 として計算した。表 3.4 から、電極全体のリング電極間のコンデンサの静電容量  $C_t$  は、①～⑰の合計で  $C_t=1.853C[F]$  となる。一方、SiC 部分（以降）のリング電極間のコンデンサの静電容量を  $C_s$  は、⑩～⑰の合計で  $C_s=0.469C[F]$  となる。よって、求める SiC 部分の充放電の電流  $i_s$  は、 $i_s=i_c \times (C_s/C_t) = 1386 \mu A \times 0.469C/1.853C \approx 350 \mu A$  と求められる。また、先に求めたコロナ放電による電流  $i_D$  ( $14 \mu A$ ) も SiC 部分を通過するので、これを  $i_s$  に加えると、発熱に寄与すると考えられる電流値は、およそ  $360 \mu A$  前後となる。

以上より、15kHz、 $\pm 5 \sim 6kV$  の印加電圧によって、抵抗値  $1.2 \times 10^7 \Omega$  の SiC を組み込んだ自己発熱型電極が  $120^\circ C$  程度に加熱する際の発熱に寄与する電流値を、発熱した熱量と、イオナイザーの供給電流値から概算した結果、発熱量から求めた電流値は約  $210 \mu A$ 、イオナイザーの供給電流から求めた電流値は約  $360 \mu A$  となり、概ね数百  $\mu A$  のオーダーであると予想される。また、コロナ放電によってイオンとして放出する電流値は十数  $\mu A$  であることから、イオナイザーから供給された電流のごく一部であると考えられる。

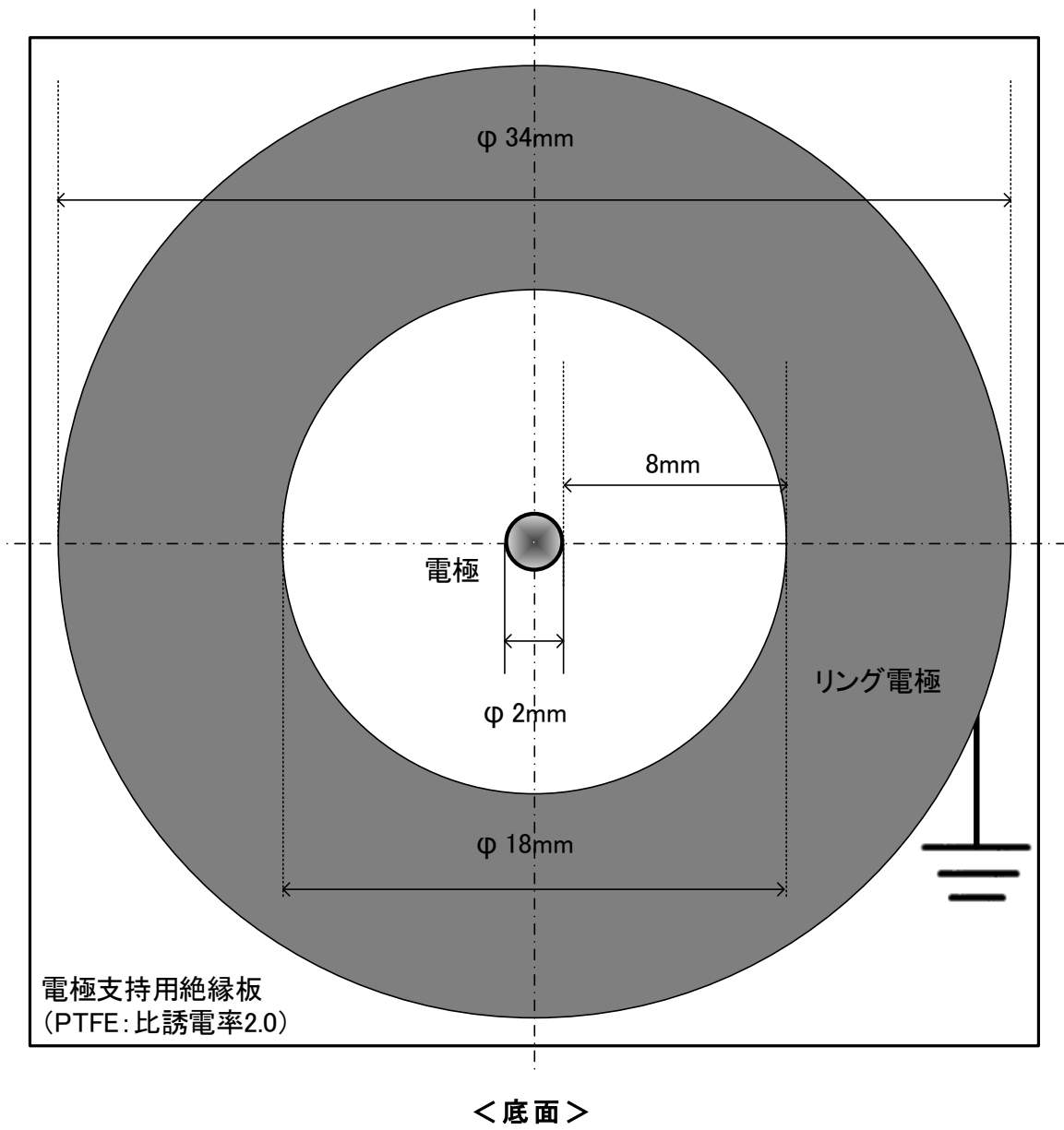


図 3.30 電極と電極支持用絶縁板の詳細（底面）

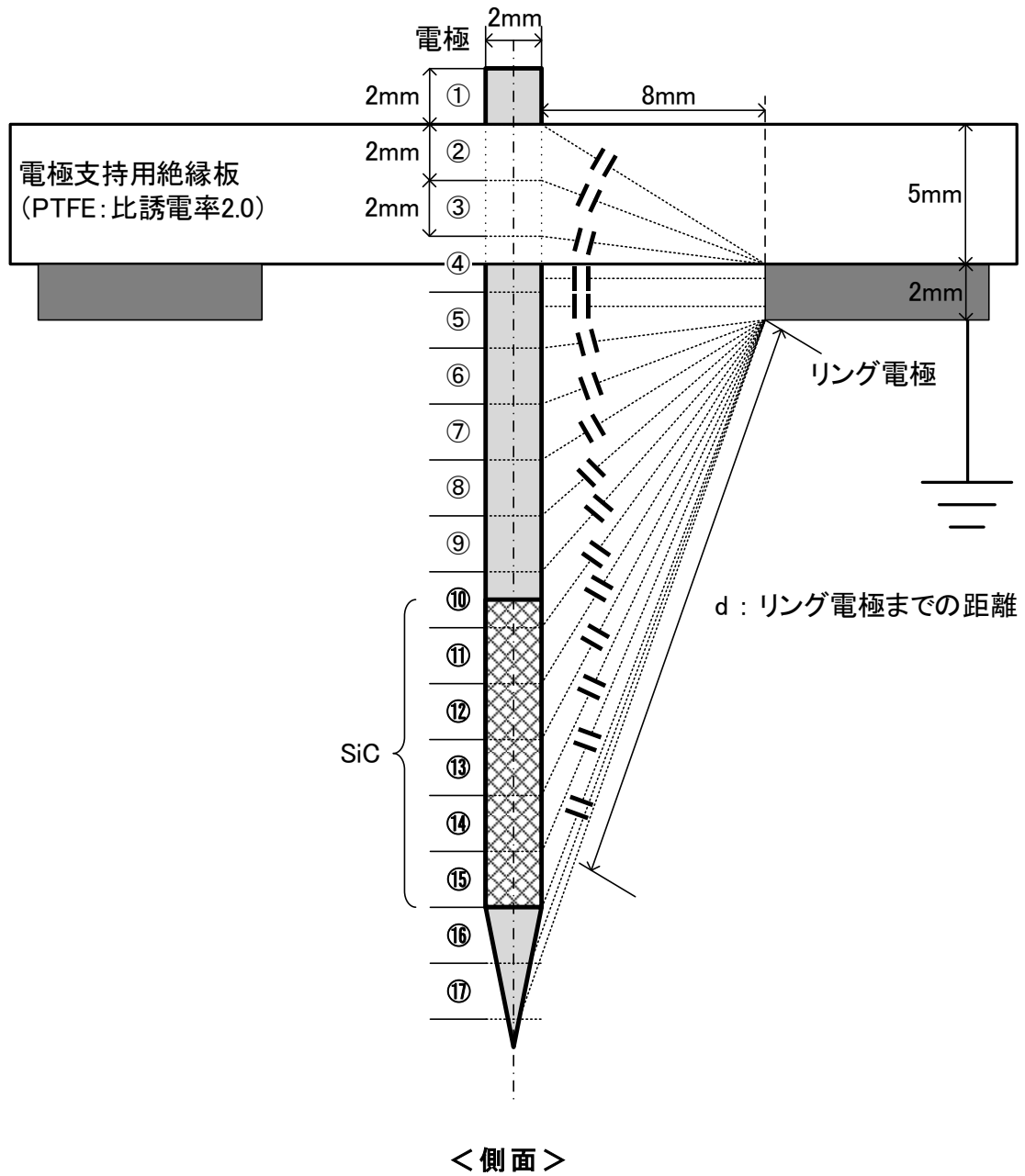


図 3.31 電極と電極支持用絶縁板の詳細（分割配置、側面）

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad \text{または} \quad C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (3.13)^{21)}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (3.14)^{21)}$$

$C$  : 平行平板コンデンサの静電容量 [F]

$\varepsilon_0$  : 真空の誘電率 [F]

$\varepsilon$  : 物体の誘電率 [F]

$\varepsilon_r$  : 比誘電率 [-]

$S$  : 平行平板電極の表面積 [m<sup>2</sup>]

$d$  : 平行平板電極間距離 [m]

表 3.4 電極の各ブロックの接地極間コンデンサの静電容量

ブロックNo.	リング電極までの距離:d[mm]	1/d	静電容量(係数:C)	配置
①	9.4(PTFE)	0.106	0.212C	
②	8.5(PTFE)	0.117	0.234C	
③	8.1(PTFE)	0.124	0.248C	
④	8.0	0.125	0.125C	
⑤	8.0	0.125	0.125C	
⑥	8.1	0.124	0.124C	
⑦	8.5	0.117	0.117C	
⑧	9.4	0.106	0.106C	
⑨	10.6	0.094	0.094C	
⑩	12.0	0.083	<b>0.083C</b>	
⑪	13.6	0.074	<b>0.074C</b>	
⑫	15.3	0.066	<b>0.066C</b>	
⑬	17.0	0.059	<b>0.059C</b>	
⑭	18.8	0.053	<b>0.053C</b>	
⑮	20.6	0.049	<b>0.049C</b>	
⑯	22.5	0.044	<b>0.044C</b>	
⑰	24.4	0.041	<b>0.041C</b>	

### 3. 2. 5 自己発熱型電極イオナイザーの除電性能と異物付着抑制効果

次に、自己発熱型電極を取り付けたイオナイザーについて、除電性能と異物付着抑制効果の確認評価を行った。

#### (1) 自己発熱型電極イオナイザーの除電性能

除電性能は、電極 1 本あたりの有効除電電流と、帯電プレートモニタによる除電時間を測定し、一般的な市販のイオナイザーで用いられることの多いタングステン電極と比較することによって評価した。測定に用いた電極の抵抗値は、 $1.2 \times 10^7 \Omega$ であった。

図 3.32 に有効除電電流の測定装置の概略を示す。自己発熱型電極とタングステン電極の形状は共通である。イオナイザーによる電圧印加は、15kHz の交流電圧で約 5kV～7kV（イオナイザー設定）とした。有効除電電流の測定は、第 2 章で述べた静電気ハンドブック記載の方法に準拠して行った<sup>22)</sup>。電極の先端から 50mm 隔てた位置に絶縁された金属平板（200mm×200mm）を配し、直流高圧電源（マクセレック製 Model AMK-20K1PNBX1）を用いて、金属平板に+5kV または-5kV を印加したときに、金属平板に流れ込む電流をデジタルマルチメーター（カスタム製 CDM-270）で測定した。

図 3.33 に測定結果を示す。電極への印加電圧が高くなるほど有効除電電流値が増加しており、金属平板に補足されるイオン量が増えている。また、自己発熱型電極とタングステン電極の有効除電電流値には大きな差はみられなかった。

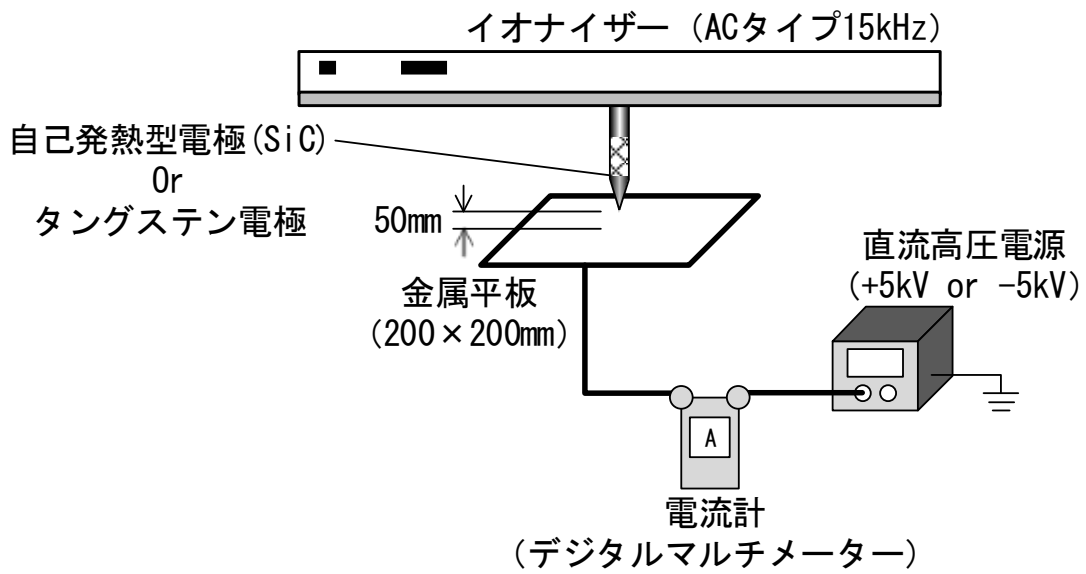


図 3.32 有効除電電流の測定装置概略

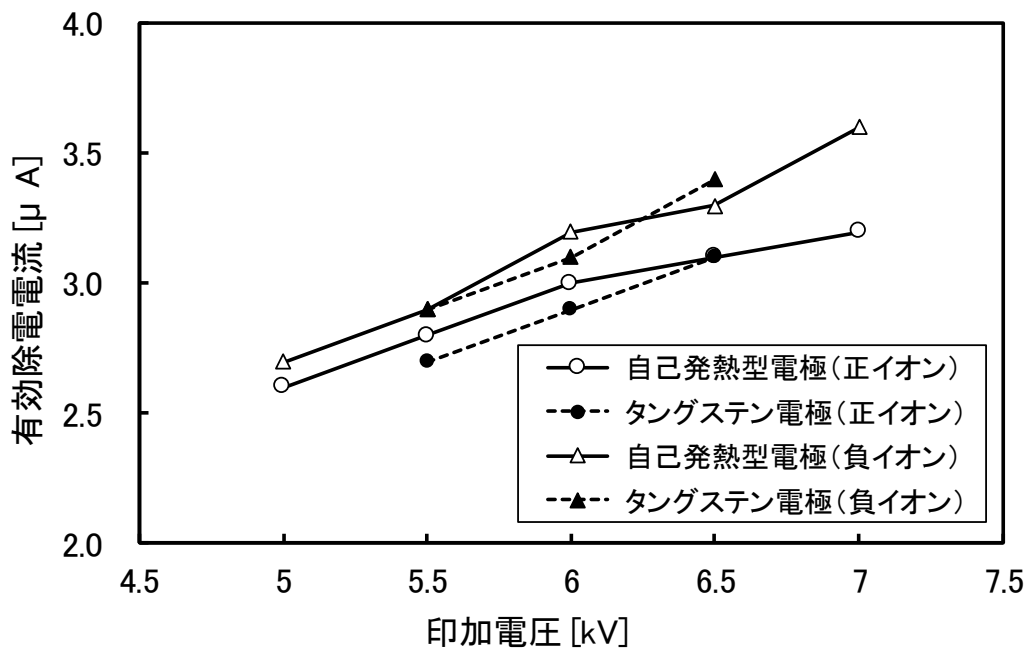


図 3.33 有効除電電流の測定結果 (正負イオン)



次に、図 3.34 に帯電プレートモニタによる除電時間の測定装置の概要を示す。有効除電電流の測定と同様にそれぞれの電極を取り付け、電極の先端から 50mm もしくは 200mm 隔てた位置に帯電プレートモニタ (Trek 製 Model 158) の金属プレート (152 mm×152 mm, 20 pF±2 pF) を設置し、+1000V または -1000V から 1/10 の ±100V まで減衰する時間を測定した。除電時間は短いほど、除電性能が優れていることを示す。また、金属プレートを正極性に帯電させた場合は、負イオンによる除電性能を、負極性の場合は、正イオンによる除電性能を評価したことを示す。

図 3.35 に負イオンによる除電時間の測定結果を示す。電極への印加電圧が高くなるほど除電時間が短くなり、除電性能は向上している。また、有効除電電流の測定と同様、自己発熱型電極とタングステン電極の除電時間はほぼ同等で、大きな差はみられなかった。なお、正イオンによる除電時間も同様の傾向を示した。

以上の結果より、自己発熱型電極 (SiC) のイオン生成能力は、同一の電圧印加であれば、一般的なタングステン電極とほぼ同等の性能を有しており、イオナイザー (除電器) としての除電性能面で、問題無く適用可能であると思われる。

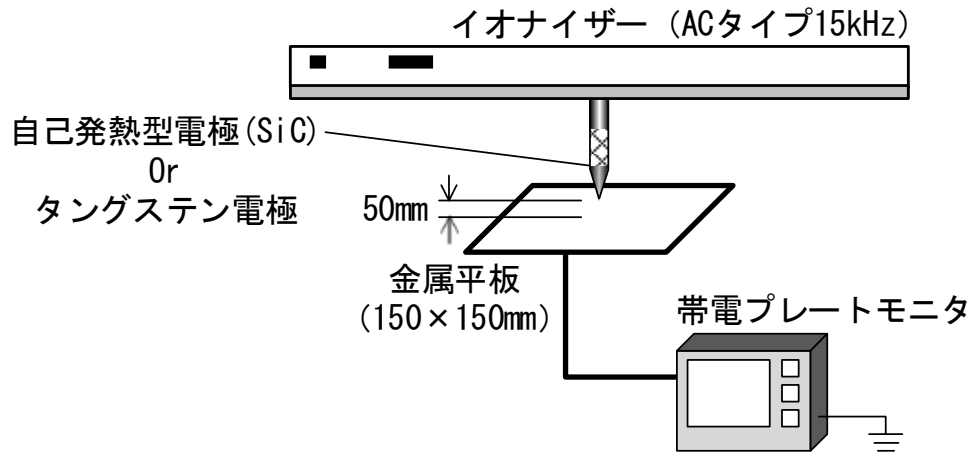


図 3.34 除電時間の測定装置概略

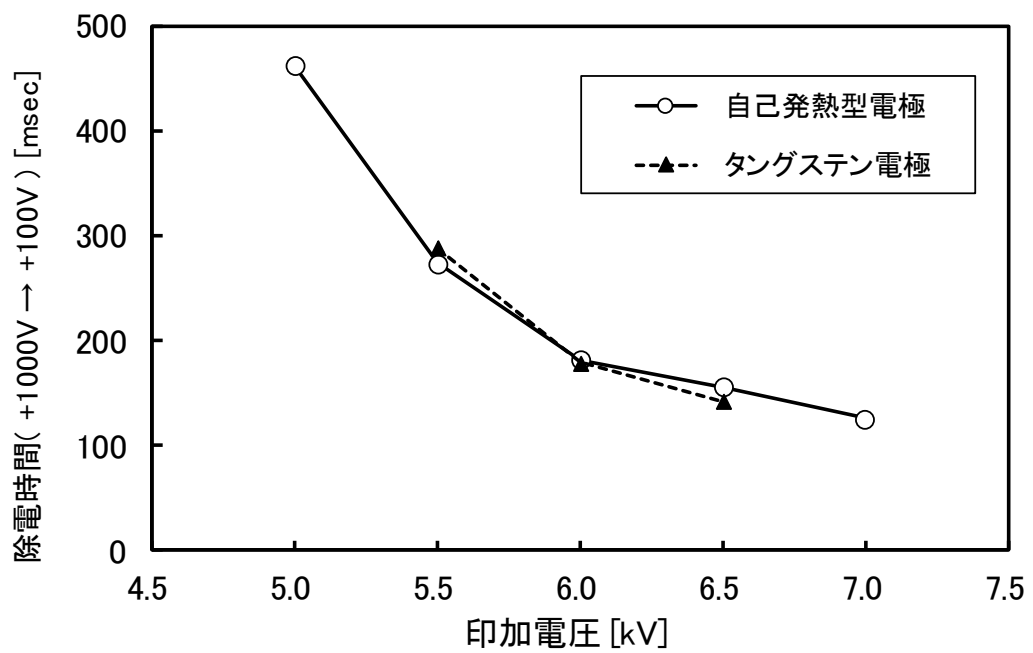


図 3.35 除電時間の測定結果 (測定距離 : 50mm)

## (2) 自己発熱型電極イオナイザーの異物付着抑制効果

図 3.36 に、自己発熱型電極の発熱による電極への異物付着抑制効果の確認実験装置の概略を示す。同タイプのイオナイザー（シムコイオン製 MP5625）を 2 台用意し、イオナイザーA には自己発熱型電極を、イオナイザーB にはタングステン電極をそれぞれ 2 本ずつ（2 検体）装着して、一定時間運転し、電極先端部への異物の付着状況を観察した。測定に用いた電極の抵抗値は、 $1.2 \times 10^7 \Omega$  であった。ここで自己発熱型電極は、電圧を印加した際に SiC 部分の高抵抗（ $10^7 \Omega$ ）により電圧降下が生じるため、SiC 部分を隔てたコロナ放電部は、電圧印加部より電圧が低くなる。そのため、2 台のイオナイザーが同一設定の場合、イオナイザーA の自己発熱型電極は、イオナイザーB のタングステン電極より低い電圧でコロナ放電を発生し、この差が異物付着量に影響を及ぼす恐れがある。そこで、イオナイザーA（自己発熱型電極）の印加電圧を 15kHz、約  $\pm 5 \sim 6$  kV、イオナイザーB（タングステン電極）の印加電圧を 15kHz、約  $\pm 4 \sim 5$  kV とし、イオナイザーA をイオナイザーB より 1~2kV 程度高く設定して実験を行った。この設定は、前節 3. 2. 4 - (2) の発熱に寄与したイオナイザーからの供給電流の測定において、抵抗体（SiC）以降を通過して発熱に寄与した電流値が数百  $\mu$  A という計算結果より、約 200  $\mu$  A としたときの電流値と電極の抵抗値（ $1.2 \times 10^7 \Omega$ ）から、 $V = IR = 200 \times 10^{-6} \times 1.2 \times 10^7 = 2400$  V と電圧降下分を概算したことに基づいている。電極先端部の観察には、実体顕微鏡（KEYENCE 製 VXH-1000）を用いた。また、除電性能の比較実験と同様、電極の形状は共通である。

図 3.37~図 3.38 に、イオナイザーA（自己発熱型電極）とイオナイザーB（タングステン電極）の異物の付着状況の比較の結果を示す。初期状態の実態顕微鏡写真を図 3.37 に、約 860 時間運転後の状態を観察した顕微鏡写真を図 3.38 に示す。イオナイザーA とイオナイザーB のどちらの電極先端部にもシロキサンが粒子化した  $\text{SiO}_2$  と思われる、白い結晶状の異物が見られるが、付着量を比較するとイオナイザーA の自己発熱型電極の付着量が少ない結果となった。この結果から、自己発熱型電極をイオナイザーの放電電極に適用することで、微粒子の付着を低減できることが示された。

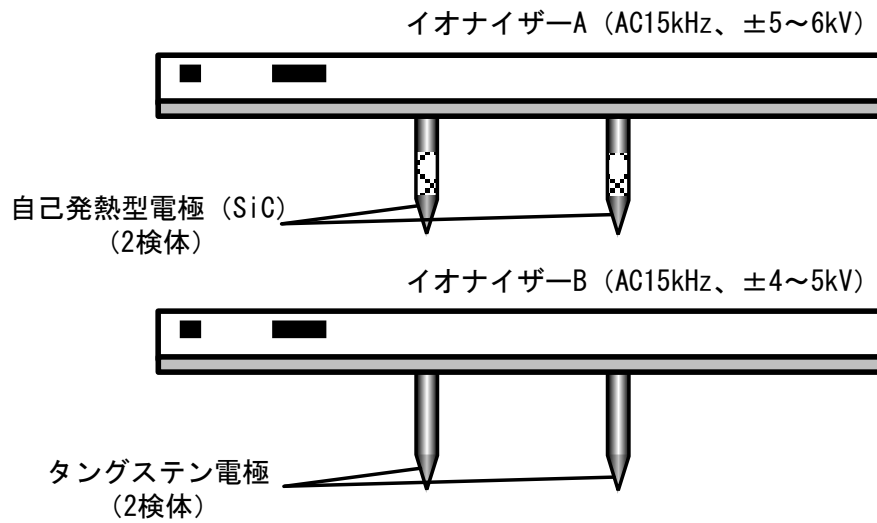


図 3.36 自己発熱型電極の異物付着抑制効果確認実験

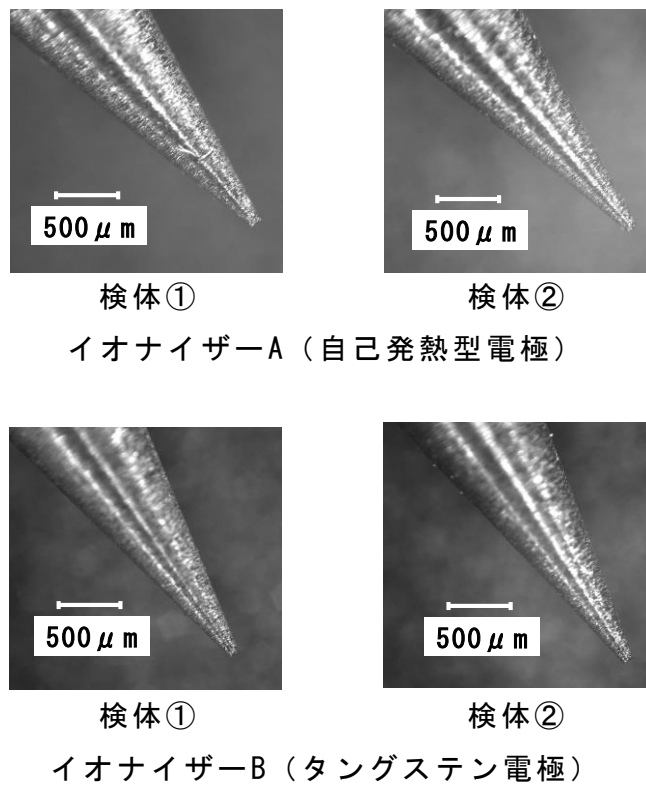
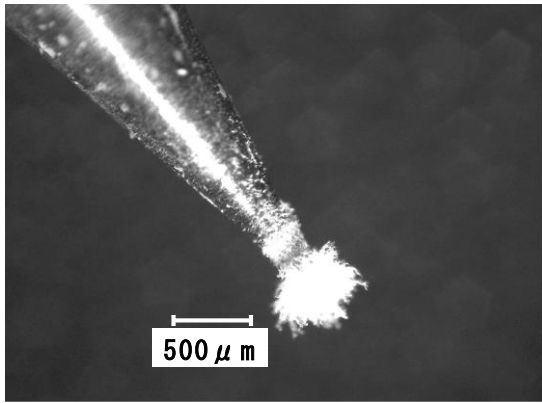
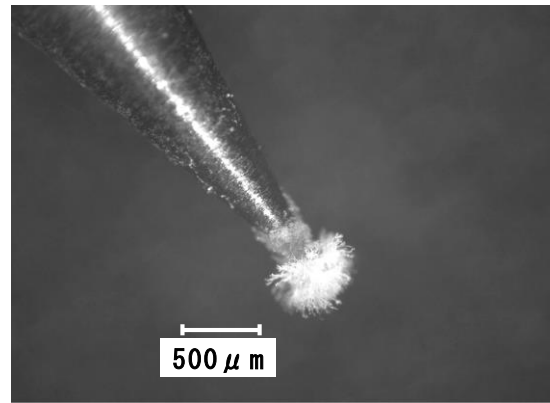


図 3.37 電極先端部実体顕微鏡写真 (初期状態)

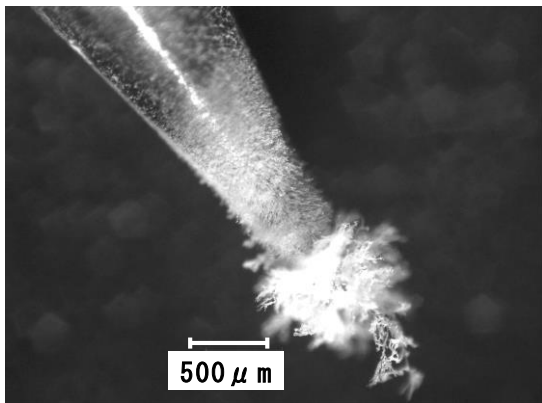


検体①

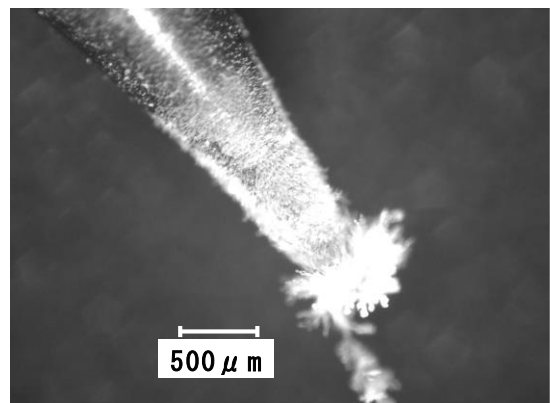


検体②

イオナイザーA（自己発熱型電極）約±5～6kV印加



検体①



検体②

イオナイザーB（タングステン電極）約±4～5kV印加

図 3.38 電極先端部実体顕微鏡写真（約 860 時間運転後）

### 3. 3 耐摩耗性金属による放電電極の摩耗抑制

コロナ放電式イオナイザーのもう一つの発塵原因である、放電電極の摩耗について、鈴木ら<sup>2)</sup>が開発した既存の耐摩耗性放電電極の摩耗量をさらに低減するために検討を行った。既存の耐摩耗性電極は、基材にランタン・タングステン合金を用い、表層をニッケルでメッキしており、従来、広く使用されているタングステン電極に比べると、1/10 から 1/100 の摩耗量であった<sup>23)</sup>。しかしながら、既存の耐摩耗性電極からの電極材の飛散量は  $1.1 \times 10^9 \text{ atoms/cm}^2$  で、ITRS ロードマップ（2011 年版）で許容されている金属汚染量の値 ( $5.0 \times 10^9 \text{ atoms/cm}^2$ ) とほぼ同等<sup>23)</sup> であることから、さらなる摩耗量低減が求められていた。以下に、試作した新しい耐摩耗性電極について摩耗量を評価した結果を述べる。

#### 3. 3. 1 耐摩耗性電極材料の検討

放電電極のコロナ放電による摩耗現象は、第 2 章でも述べたように正極において著しく進行し、その原因としては酸化を伴う化学スパッタリングが生じることに起因すると考えられている<sup>24, 25)</sup>。そのため、電極表層の金属の耐腐食性を向上することで、酸化されにくい状態、つまり化学スパッタリングされにくい状態をつくるのが可能である。そこで、まず、金属の腐食性を示す仕事関数に着目し、既存の耐摩耗性電極の表層金属であるニッケルよりも大きな仕事関数を持つ金属を候補として選択した。仕事関数は、金属結晶内の原子から電子を引き離すのに必要な仕事量で、この値が大きいほど金属としては安定（不活性）で、酸化されにくいことを示す<sup>26, 27)</sup>。さらに、金属の強度の面では、一般に、融点が高い物質ほど原子間距離が短く、結合エネルギーが大きいので、物性としては強固となることが知られている。そこで、ニッケルよりも高融点の金属を選択した。これらの条件から、表層の金属として、Ir（イリジウム）と Rh（ロジウム）を選択した。表 3.5<sup>27, 28)</sup> に、既存の Ni（ニッケル）と Ir（イリジウム）、Rh（ロジウム）、他金属の物性表を示す。耐摩耗性電極の基材としては、既存のランタン・タングステン合金を用いた。

表 3.5 各種金属の仕事関数と融点 <sup>27, 28)</sup>

金属	仕事関数 [eV]	融点 [°C]
Ni (ニッケル)	4.61	1455
<b>Ir (イリジウム)</b>	<b>5.60</b>	<b>2446</b>
<b>Rh (ロジウム)</b>	<b>4.98</b>	<b>1964</b>
Pt (白金)	5.36	1769
Au (金)	4.71	1064

### 3. 3. 2 耐摩耗性電極の摩耗量の評価試験

#### (1) 耐摩耗性電極の金属飛散量

試作したイリジウムメッキ電極、およびロジウムメッキ電極の、コロナ放電時における金属飛散量の測定を行った。試作したイリジウムメッキ電極、ロジウムメッキ電極の表層金属（イリジウム、ロジウム）のメッキ厚さは製作上の制限から  $10\mu\text{m}$  以下であった。図 3.40 に実験装置を示す。一方向流タイプのクリーンルーム（ $0.02\mu\text{m}$  Class1、一方向流  $0.3\text{m/s}$ 、 $23^{\circ}\text{C}$ ）内に、パルス DC タイプのイオナイザー（シムコイオン製 Nilstat5184e、印加電圧： $+23\text{kV}/-23\text{kV}$ 、交番タイミング：1 秒）を設置し、そのイオナイザーにそれぞれの電極を装着してコロナ放電を発生させる。電極の直下には  $\phi 100\text{mm}$  の鏡面ウェハを設置して、193 時間運転後、鏡面ウェハの表面をフッ酸で溶かし出し、鏡面ウェハ上にトラップした各電極の表層部の金属であるイリジウム原子またはロジウム原子の量を、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）により定量分析した。尚、用いた電極の形状は、 $\phi 2\text{mm}\times 27\text{mmL}$  で、電極先端が約  $\phi 50\mu\text{m}$  の円錐台形である。

試作したイリジウムメッキ電極、ロジウムメッキ電極の表層部からの金属原子の飛散量の定量分析結果を表 3.6 に示す。比較として、既存の耐摩耗性放電電極（ニッケルメッキ）も示す。イリジウムメッキ電極の金属原子飛散量は既存のニッケルメッキ電極のおよそ  $1/100$ 、ロジウムメッキ電極の金属原子飛散量は、既存の  $1/100$  以下であった。



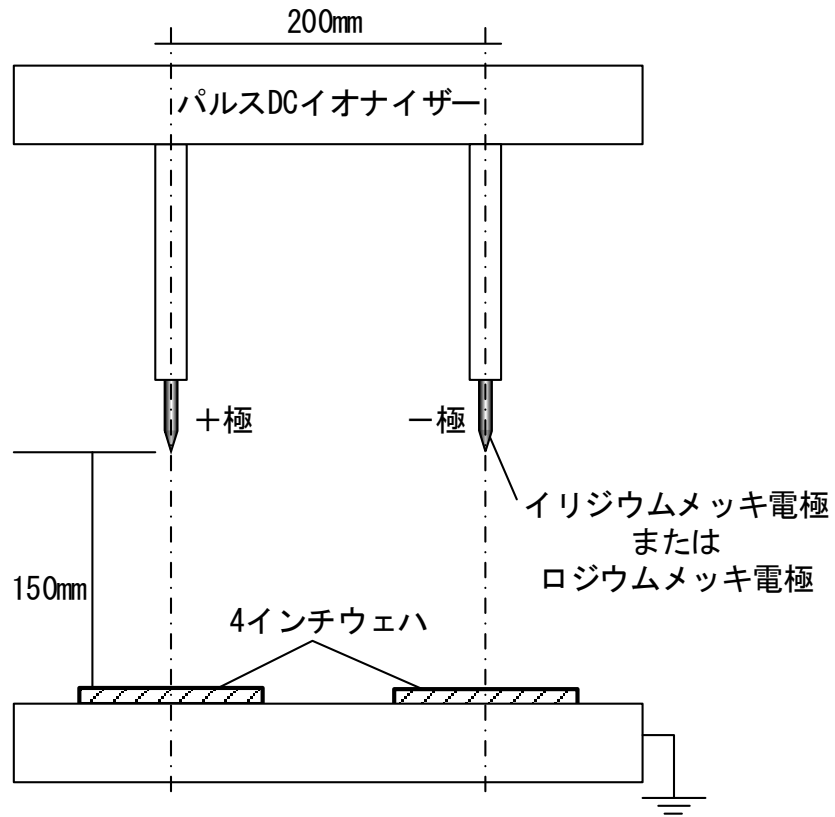


図 3.40 金属飛散量測定の実験装置

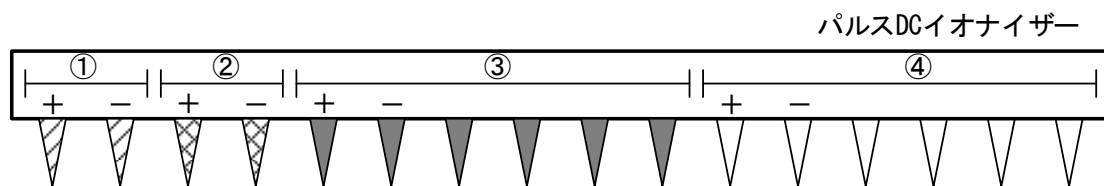
表 3.6 金属飛散量測定の測定結果

	Ir(イリジウム)原子数 [atoms/cm <sup>2</sup> /hr]	Rh(ロジウム)原子数 [atoms/cm <sup>2</sup> /hr]	Ni(ニッケル)原子数 [atoms/cm <sup>2</sup> /hr]
+電極直下	$2.5 \times 10^7$	—	$1.1 \times 10^9$
-電極直下	—	—	$1.6 \times 10^8$
バックグラウンド	—	—	—
検出下限値	$0.8 \times 10^7$	$1.6 \times 10^7$	$2.6 \times 10^7$

## (2) 耐摩耗性電極の長期耐久試験

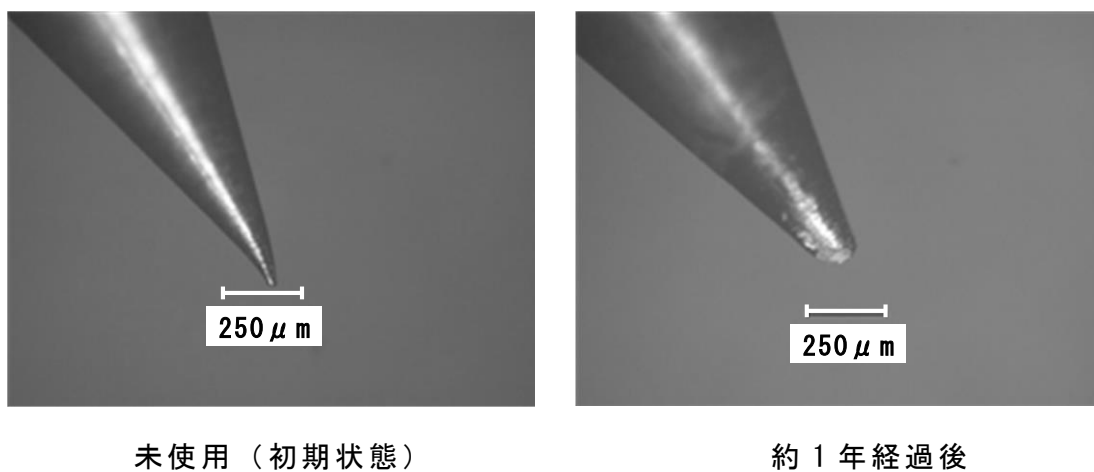
次に、試作したイリジウムメッキ電極、およびロジウムメッキ電極の長期耐久試験を行った。実験装置を図 3.41 に示す。上述のクリーンルーム内に、パルス DC タイプのイオナイザー（シムコイオン製 AeroBar Model 5225S）を設置して、その正極と負極用の 8 対のチャックに、それぞれイリジウムメッキ電極 3 対、ロジウムメッキ電極 3 対、比較のためにタングステン電極 1 対と既存のニッケルメッキ電極 1 対を装着して運転した。イオナイザーの設定は、印加電圧を +5.1kV/-4.8kV、交番タイミングを 1 秒、とした。電極の形状は、金属飛散量測定と同様で、運転時間は約 1 年間（10200 時間）とした。

長期耐久試験の結果を図 3.42～3.45 に示す。これらの写真は、未使用（初期状態）と約 1 年経過後の各電極の状態を、実体顕微鏡（キーエンス製 VHX-100）で撮影したものである。一般に使用されているタングステン電極は、著しく磨耗（形状変化）しているが（図 3.42）、既存のニッケルメッキ電極、試作したイリジウムメッキ電極とロジウムメッキ電極は、磨耗が無いことが分かる（図 3.43～図 3.45）。ただし、3 対のロジウムメッキ電極の内 1 対は、正電極に磨耗が確認された。ロジウムメッキ電極については、製作の段階で、基材のランタン・タングステンにロジウムがメッキしにくいことが判っており、そのため品質にバラツキ出てしまったものと思われる。対策としては、基材にロジウムをメッキした後、水素雰囲気中で焼き締め処理（500℃、20min 程度）を施すことで、基材とロジウムメッキの接着度が向上すると思われる。尚、負極については、ほとんど磨耗（形状変化）が確認されなかった。



- ① タングステン電極
- ② 既存のニッケルメッキ電極
- ③ イリジウムメッキ電極
- ④ ロジウムメッキ電極

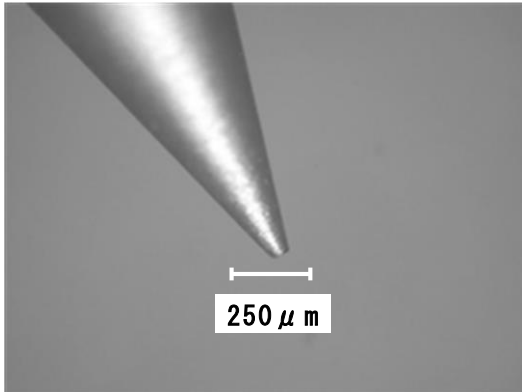
図 3.41 長期耐久の実験装置



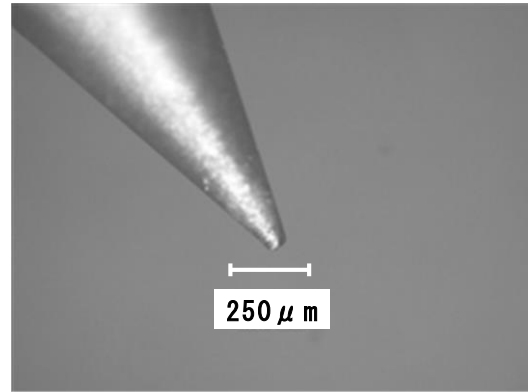
未使用（初期状態）

約1年経過後

図 3.42 タングステン電極の摩耗状態（正極）

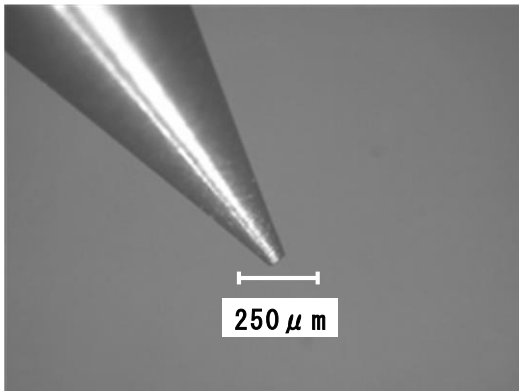


未使用（初期状態）

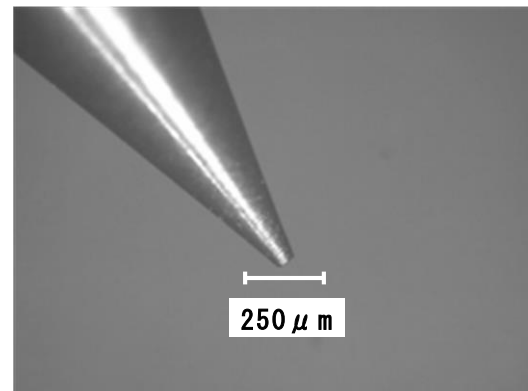


約1年経過後

図 3.43 既存のニッケルメッキ電極の摩耗状態（正極）

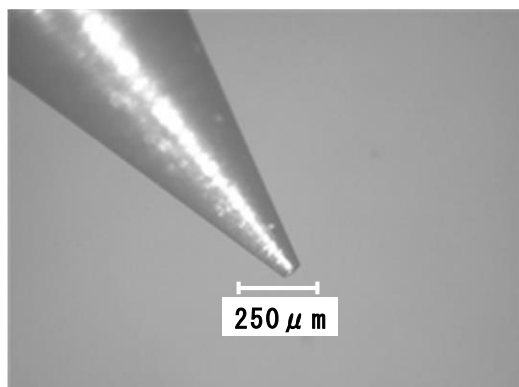


未使用（初期状態）

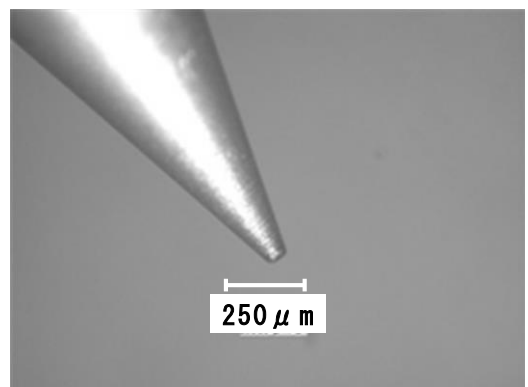


約1年経過後

図 3.44 イリジウムメッキ電極の摩耗状態（正極）



未使用（初期状態）



約1年経過後

図 3.45 ロジウムメッキ電極の摩耗状態（正極）

### 3. 4 まとめ

第3章では、クリーンルーム用としてコロナ放電式イオナイザーを適用するための低発塵化について検討した。

前半では、コロナ放電式イオナイザーの放電電極への微粒子付着に起因する発塵に対して、放電電極を加熱することにより発生する熱泳動力をを用いて微粒子の付着防止を試みた、電極加熱式イオナイザーを提案した。以下に検討結果を示す。

- ①簡易モデルを設定して微粒子付着の抑制が可能な熱泳動力を得るための温度勾配を試算した結果、 $0.001\mu\text{m}$ 以上の粒子に対しては、 $100^{\circ}\text{C}$ 以下の温度差を周囲との間に形成すれば良いことが示された。
- ②イオナイザー電極を $90^{\circ}\text{C}$ 程度に加熱する実験にて、電極を加熱しない場合に比べて異物付着量が減少する結果を得た。
- ③実用的な電極の加熱方法として、抵抗体のジュール加熱を用いた自己発熱型電極を考案し、抵抗体の抵抗値を調整することで任意の温度に加熱可能であることが示された。
- ④抵抗体にSiCを組み込んだ自己発熱型電極（以降SiC電極）の発熱について、イオナイザーの交流電圧の周波数は数kHz以上で、電圧が高いほど、発熱量が大きいことが示された。
- ⑤SiC電極が $120^{\circ}\text{C}$ 程度に発熱する場合、イオナイザーから供給される電流のうち、発熱に寄与するのは数百 $\mu\text{A}$ 程度、コロナ放電電流は十数 $\mu\text{A}$ 程度あると考えられる。
- ⑥SiC電極を用いた電極加熱式イオナイザーについて、除電性能、微粒子付着防止効果の評価実験を行い、従来のイオナイザー電極と同等の除電性能を有しながら、微粒子付着量を低減できることが示された。

また後半では、イオナイザーの放電電極の摩耗に起因する発塵に対して、現行電極の耐摩耗性能の向上について検討した。電極の表層金属として、現行の表層金属のニッケルよりも仕事関数が大きく、融点の高いイリジウム、ロジウムを配することで、電極からの金属飛散量を現行の1/100以下に抑え、耐摩耗性が向上することが示された。

### 第3章 参考および引用文献

- 1) 並木則和：クリーンルーム環境におけるガス-粒子変換—イオナイザ電極における粒子生成に着目して—，クリーンテクノロジー，4巻7号（1994）p.67
- 2) 鈴木政典，鈴木国夫，田中政史，山路幸郎：無発塵空気イオン化システムの開発，空気清浄，26巻5号（1989）p.48
- 3) 鈴木佐夜香，桑名一徳，土橋律：すすの熱泳動挙動の予測手法に関する研究，日本燃焼学会誌，52巻159号（2010）p.68
- 4) B. Y. H. Liu, B. Fardi, K. H. Ahn : Deposition of Charged and Uncharged Aerosol Particles on Semiconductor wafers, Proceeding of 33rd Annual Technical Meeting of the IES (May, 1987) p.461
- 5) Sparrow, E. M, G. T. Geiger : Local and average heat transfer characteristics for a disk situated perpendicular to a uniform flow , J. Heat Transfer, Vol. 107 (5. 1985) p. 321
- 6) 藤井修二，謝国平，金光映：整流型クリーンルーム内における粒子沈着モデルの提案，エアロゾル化学・技術研究討論会論文集（1988）p.28
- 7) 阪田総一郎，池鯉鮒悟，井上正憲，吉田隆紀，岡田孝夫：クリーンルーム内の静電気による粒子沈着，エアロゾル化学・技術研究討論会論文集（1988）p.36
- 8) 江見準，大谷吉生，金岡千嘉男，加藤薫：ウェハ表面への微粒子の沈着，第8回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集（1989）p.9
- 9) ウィリアム C. ハイNZ，（早川一也 訳）：エアロゾルテクノロジー，井上書院（1985）pp.149-155
- 10) 岩田康嗣：クラスターフルーツ，真空，vol. 35（1992）pp.734-740
- 11) 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社（1981）p.37
- 12) 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社（1981）p.172
- 13) ウィリアム C. ハイNZ，（早川一也 訳）：エアロゾルテクノロジー，井上書院（1985）p.149
- 14) S. K. フリードランダー：エアロゾルの科学，産業図書（1983）p.67
- 15) 静電気学会編：新版 静電気ハンドブック，オーム社（1998）p.928

- 16) 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社（1981） p. 39
- 17) 杉山幸男，黒田正和，架谷昌信：演習化学工学，共立出版（1981）  
p. 17
- 18) KYOCERA：炭化珪素詳細情報-SC-211 特性表
- 19) 架谷昌信：最新 伝熱計測技術ハンドブック，テクノシステム  
（2011） p. 213
- 20) 和田正信：放射の物理，共立出版（1982） pp. 51-56
- 21) 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社（1981） pp. 27-31
- 22) 静電気学会編：新版 静電気ハンドブック，オーム社（1988） pp. 383-  
393
- 23) 鈴木政典，佐藤朋且：クリーンルーム用イオナイザーの電極材料と摩  
耗防止について影響，第 23 回 EOS/ESD/EMC シンポジウム予稿集  
（2013） p. 98
- 24) 阪田総一郎，岡田孝夫：コロナ放電極の発塵機構の解析，静電気学会  
講演論文集（1991） p. 397
- 25) 阪田総一郎，岡田孝夫：クリーンルームにおける静電気障害とイオナ  
イザによる帯電防止，静電気学会誌，15 巻 2 号（1991） p. 134
- 26) 香月和男：初歩の電気物理読本，オーム社（1981） p. 13
- 27) 伊藤伍郎：改訂 腐食科学と防食技術，コロナ社（1979） pp. 14-16
- 28) 国立天文台編：理科年表，丸善（2003） pp. 393-407

## 第4章 クリーンルーム用無発塵イオナイザーの開発（軟X線式）

### 4.1 開発の背景と目的

コロナ放電式イオナイザー同様、電子デバイス製造のクリーンルームの静電気対策として、軟X線イオナイザーも利用されるようになってきた<sup>1-3)</sup>。このイオナイザーは、軟X線によってガス分子を直接イオン化してイオンを生成する、光照射式のイオナイザーの一種で、除電対象近傍の雰囲気が高濃度のイオンを生成するため、除電性能が優れている。また、コンタミネーションコントロールの面から、従来のコロナ放電式では不可能であった完全無発塵での除電が可能なが最大の特徴である。この利点を活かし、より高潔度を要求するプロセスや、近年では医薬品の製造分野への適用も増えている。しかしながら、第2章でも述べたように、軟X線イオナイザーの使用にあたっては、人体の被曝防止のため、法規に基づいた設置エリアの区画やインターロックなどの防護対策が必須となる<sup>4-6)</sup>点や、生産装置内の狭小部では軟X線イオナイザーの設置スペースが確保できない問題、障害物により軟X線が除電対象に直接届かない部位の除電効果が得られない点など、取り扱い上の難点があった<sup>1)</sup>。

本章では、上記に示した軟X線イオナイザーの取り扱い上の難点（安全面、性能面）を解決する新たな方式について提示することを目的とした。軟X線イオナイザーの安全使用に関しては、イオナイザーに軟X線遮蔽構造を付加することで、軟X線の外部への漏れが無い状態でイオンを供給する方式を検討し、その遮蔽効果を確認した。また、除電性能に影響を及ぼす因子として、イオナイザーへの供給エア量やイオナイザーチャンバー内の軟X線強度、チャンバー内の気流性状などが考えられたため、これら諸因子が除電性能へ与える影響について調査した。一方、狭小部の除電対策としては、イオンをチューブで搬送する方式において、イオンの搬送効率向上のために、水蒸気凝縮を利用してイオンを粗大化する方式を検討した。このイオナイザーについても、除電性能に影響する因子として、水蒸気凝縮のための加湿空気の導入方法や、冷却空気の温度条件などが考えられたことから、これら諸因子が除電性能に与える影響について調査した。以降にその結果を述べる。



#### 4. 2 遮蔽構造を持つ軟 X 線式イオナイザー

従来の軟 X 線イオナイザーの最大の特徴である、無発塵でイオンを生成する利点を活かしながら、設置場所において軟 X 線遮蔽の必要が無い、安全なイオナイザーを考案した。このイオナイザーは、軟 X 線ヘッドに空気イオン化用のチャンバーを取り付け、このチャンバー内で軟 X 線を照射することで、チャンバー内に導入された清浄度の高い圧縮空気（クリーンドライエア）をイオン化し、除電対象に吹き付けて除電するものである。使用する圧縮空気の清浄度が確保されていれば、原理的に無発塵でイオンを供給できる、クリーンなイオナイザーである。また、イオン化チャンバーについては、イオン化エアアの吹き出し部が気流（イオン化エアア）は通過するが、軟 X 線は遮蔽する構造となっており、軟 X 線の遮蔽チャンバーとしての機能も併せ持っている。図 4.1 に、考案した遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザーの外観を示す。角柱状のチャンバーの吹き出し部は、1 枚の厚みを持った多孔板状の構造となっており、この孔の孔径および板厚によって軟 X 線を遮蔽しながらイオンを供給する原理となっている。これは、第 2 章でも述べたように、イオナイザーとして用いられる軟 X 線の波長は他の X 線よりも長く、エネルギーが小さいため比較的遮蔽が容易である特徴を利用したもので、軟 X 線が透過しない材質であれば、軟 X 線の直達成分は遮蔽され、ほぼ反射も無いので、軟 X 線の漏洩については空気散乱成分のみを考慮すればよい。これにより、イオン（空気）が十分に通過する孔（開口）もった軟 X 線の遮蔽構造が可能になっている。ここで、本イオナイザーが軟 X 線の遮蔽構造である点について、第 2 章で述べた軟 X 線イオナイザーの使用に係る関連法規のうち、電離放射線障害防止規則（電離則）に定める管理区域の考え方に則れば、本イオナイザーのイオン化チャンバー（軟 X 線遮蔽チャンバー）内が管理区域にあたり、チャンバー外側の漏洩軟 X 線量は、3 月間につき 1.3mSv 未満である必要がある。しかし、1.3mSv/3 ヶ月未満の軟 X 線漏洩量は、その一日あたりの稼働時間（軟 X 線照射時間）によって線量率（1hr あたりの線量）が異なってしまふ。そこで、X 線応用装置の筐体外側における線量率の許容値が、慣例的に安全上  $1 \mu\text{Sv/hr}$  であることに準じ、ここでは、遮蔽の基準値を、チャンバーからの軟 X 線の漏れ線量率が  $1 \mu\text{Sv/hr}$  以下として検討を進めている。

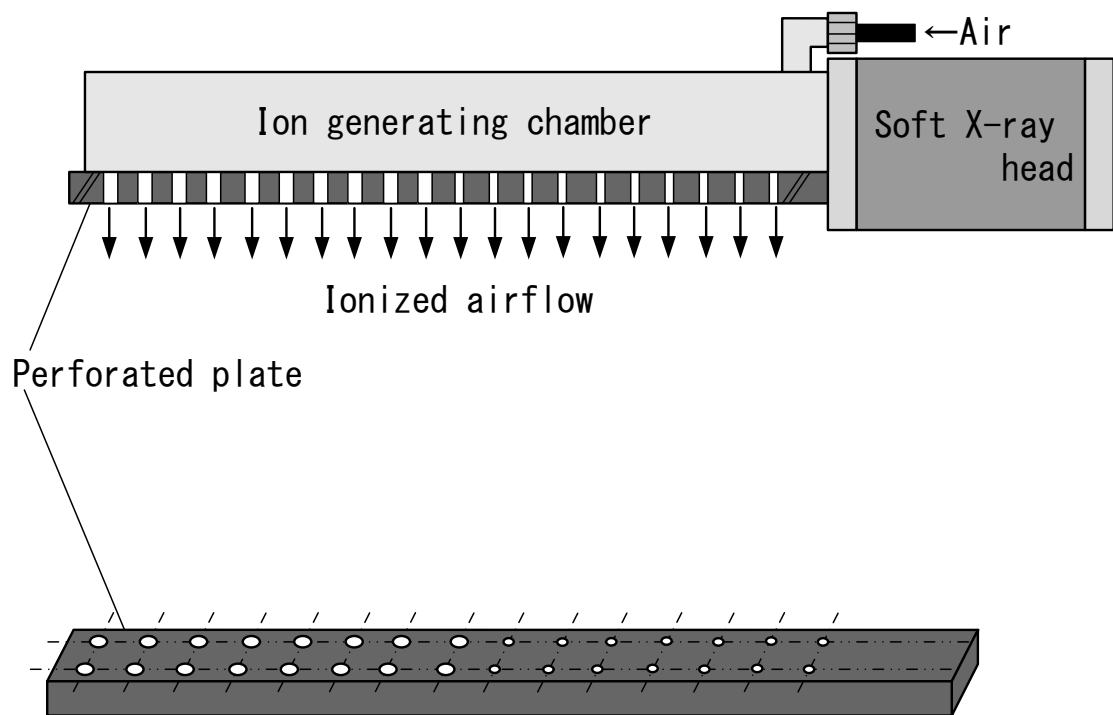


図 4.1 遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザーの外観

#### 4. 2. 1 軟 X 線の遮蔽構造の検討

考案した軟 X 線イオナイザーにおける遮蔽構造について検討を行い、チャンバー外側における軟 X 線の漏れ量率が、基準値である  $1 \mu\text{Sv/hr}$  以下であることを確認した。以下に、検討した結果について述べる。

##### (1) 軟 X 線の空気中での減弱特性<sup>7)</sup>

イオナイザーのイオン化エアー吹き出し部、つまりイオン化チャンバーの遮蔽性能を評価するためには、チャンバー内での軟 X 線の強度と、孔を透過してくる軟 X 線量を把握しなければならない。そこでまず、軟 X 線の空気中での距離による減弱特性を調べた。実験は、図 4.2 に示すように、軟 X 線ヘッド（浜松ホトニクス製 仕様-表 4.1）の照射方向に、測定窓が光軸上になるように電離箱式サーベイメータ（ビクトリーン製 450B-SI）を設置し、線源から光軸に沿ってサーベイメータを遠ざけながら、線量率を測定した。軟 X 線ヘッドから照射される軟 X 線は  $130^\circ$  の円錐上に広がるが、光軸上の線量率が最も強度が大きい分布となるため、この点で測定を行った。軟 X 線ヘッドの仕様を表 4.1 に、測定結果を図 4.3 に示す。軟 X 線の線量率は、距離の増加に伴い急激に減衰し、減衰の特性としては、4.1 式で近似された。

$$I = 4.0 \times 10^6 e^{-0.0055X} \quad (4.1)$$

I : 軟 X 線の線量率 [ $\mu\text{Sv/hr}$ ]

X : 線源からの距離 [mm]

表 4.1 軟 X 線ヘッドの仕様

項目	仕様
管電圧(DC)	9.5 kV
管電流	150 $\mu\text{A}$
出力窓材	ベリリウム(厚さ0.3mm)
イオン生成(軟X線出射)角	約 $120^\circ$ (円錐状)
軟X線波長	1.3~4.1 $\text{\AA}$ (ピーク 2 $\text{\AA}$ )
軟X線エネルギー	3~9.5keV(ピーク 6keV)

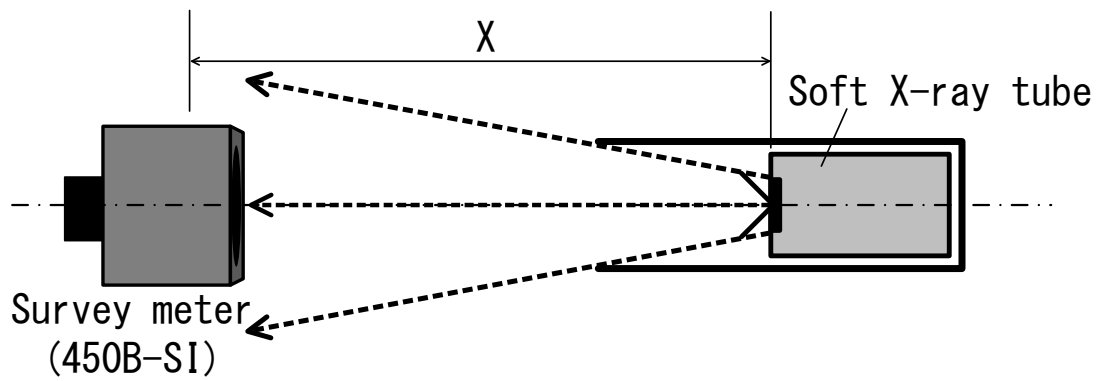


図 4.2 空気中における軟 X 線の線量率測定装置

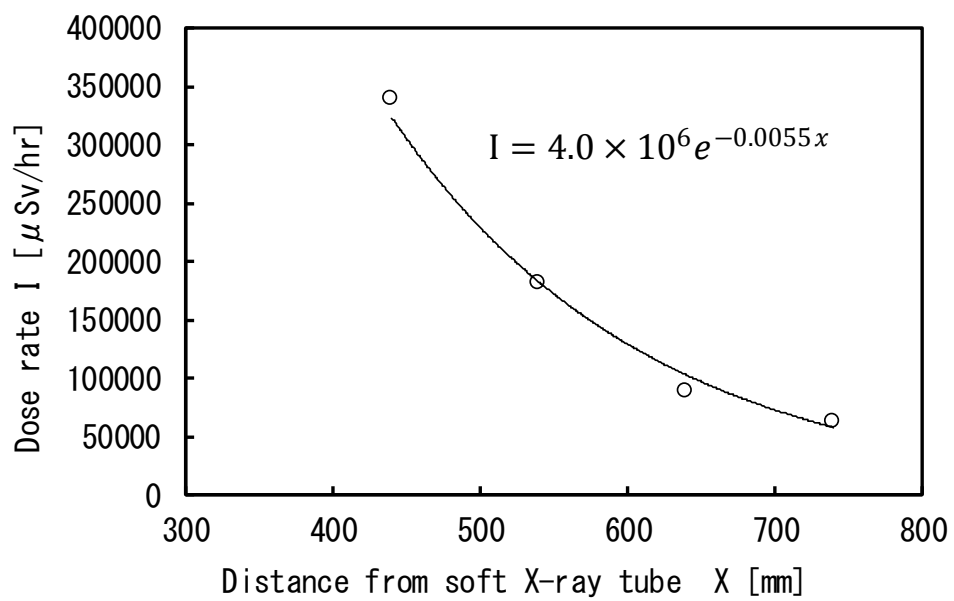


図 4.3 空気中における軟 X 線の減弱特性

## (2) イオン化チャンバーの孔からの軟 X 線の透過率

チャンバー内に照射された軟 X 線は、その一部が孔を通過して、チャンバー外に漏洩する。そこで、イオン化チャンバー内の軟 X 線強度と、孔からの軟 X 線の透過線量率との関係、つまり、孔の軟 X 線透過率を調べた。実験装置を図 4.4 に示す。実験を簡便にするため、多孔板の孔を金属のパイプで代用して、孔の孔径をパイプ径、多孔板の板厚をパイプ長として評価を行った。金属パイプのサンプルは、孔径 (d)  $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、長さ (L)  $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 15\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 30\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$  でアルミ製とした。軟 X 線ヘッドを収めたステンレス筒の中で軟 X 線を照射し、線源からの距離を変ながら、軟 X 線の照射方向 (光軸) に対して垂直にパイプを打ち込み、パイプからの漏れ線量率をサーベイメータ (アロカ製 ICS-321R1) で測定した。サーベイメータは、打ち込んだパイプの出口端面から実行中心までの距離が 65mm の位置に設置した。軟 X 線のパイプからの透過率は、図 4.4 中の①の軟 X 線強度をパイプ通過前の入射線量率 ( $I_{\text{inlet}}$ )、②の位置でサーベイメータによって測定される漏れ線量率を透過線量率 ( $I_{\text{outlet}}$ ) とし、透過線量率を入射線量率で除して求めた。軟 X 線源から任意の距離における入射線量率は、前項の軟 X 線の空気中での減弱特性から求めた式 4.1 を用いて計算した。

図 4.5～図 4.8 に、種々のパイプ 1 本あたりの、入射線量率と透過率の関係を示す。入射線量率が小さいほど (軟 X 線源からの距離が長いほど) 透過率は小さく、入射線量率の増加とともに (軟 X 線源に近くなるほど) 透過率は大きくなるのがわかる。これは、軟 X 線ヘッドから照射される軟 X 線の直達成分はパイプによって 100%カットされているが、入射線量率が大きいほど、つまり軟 X 線源に近いほどまた、パイプの入り口近傍における軟 X 線の散乱成分の線量率が大きくなるため、透過率が大きくなったと考えられる。また、パイプの径は小さいほど、パイプの長さは長いほど透過率は小さく、軟 X 線を遮蔽し易いことがわかる。これより、パイプへの入射線量率が大きい場合 (軟 X 線源に近い位置) では、径が小さく、長いパイプを用いることで軟 X 線の漏れを防ぐことができ、パイプへの入射線量率が小さい場合 (軟 X 線源から離れた位置) では、パイプ径が大きく、長さが短いパイプを選択できる。イオナイザーとしては、イオンの供給量と除電性能が比例するため、より多くのイオン化エアアを除電対象に

供給する必要がある。そのため、孔内を正負イオンが通過する際の再結合による消耗や、空気の圧力損失を考慮すると、なるべくパイプ径が大きく、パイプ長が短いものが有利となる。

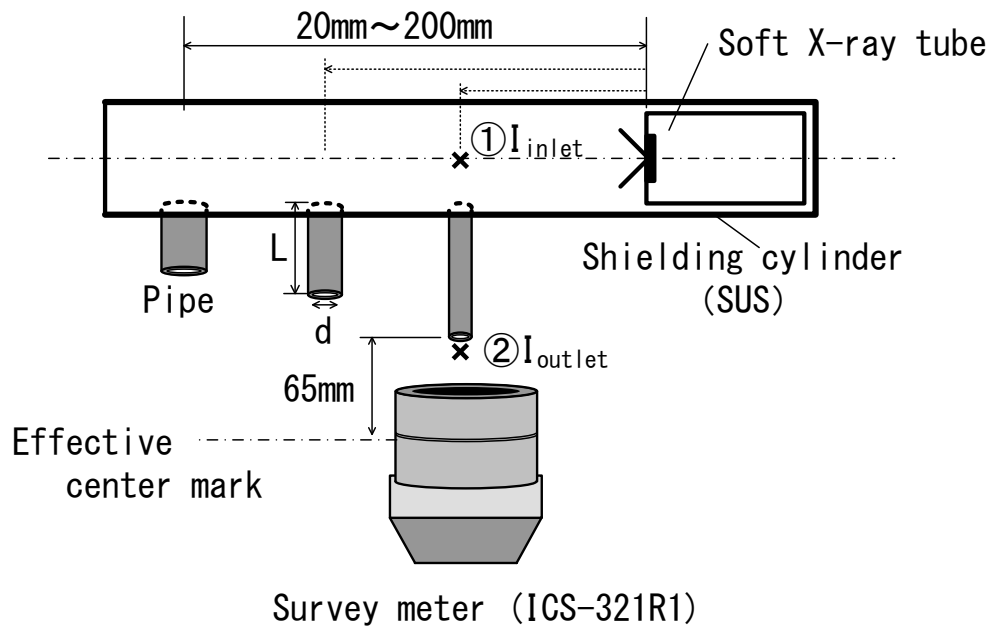


図 4.4 パイプからの軟 X 線漏洩量測定の実験装置

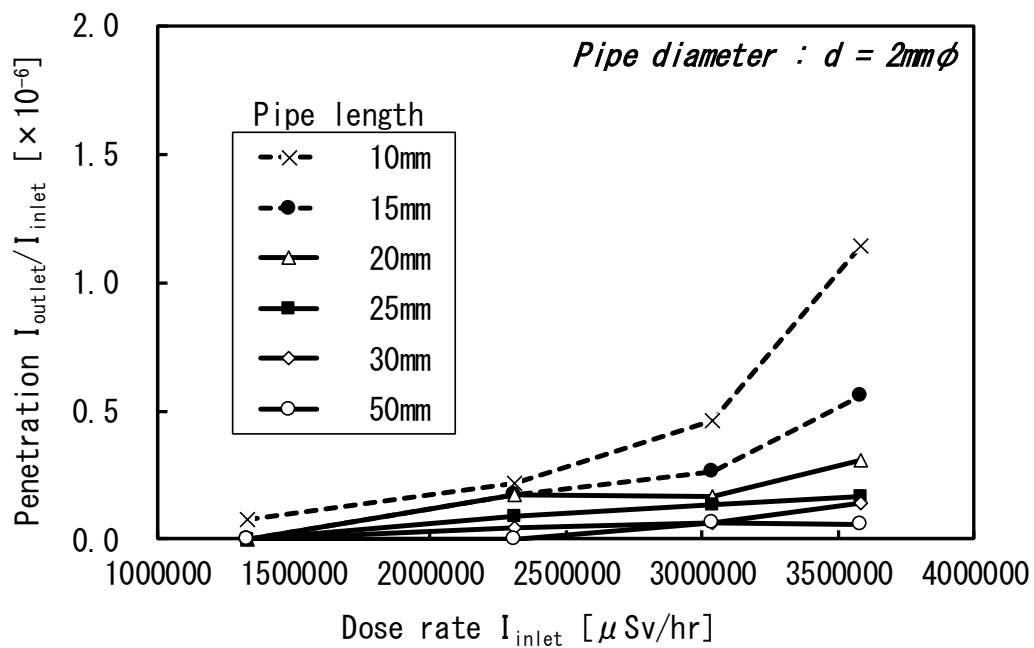


図 4.5 チャンバー内軟 X 線強度（入射線量率）と透過率（径：φ 2mm）

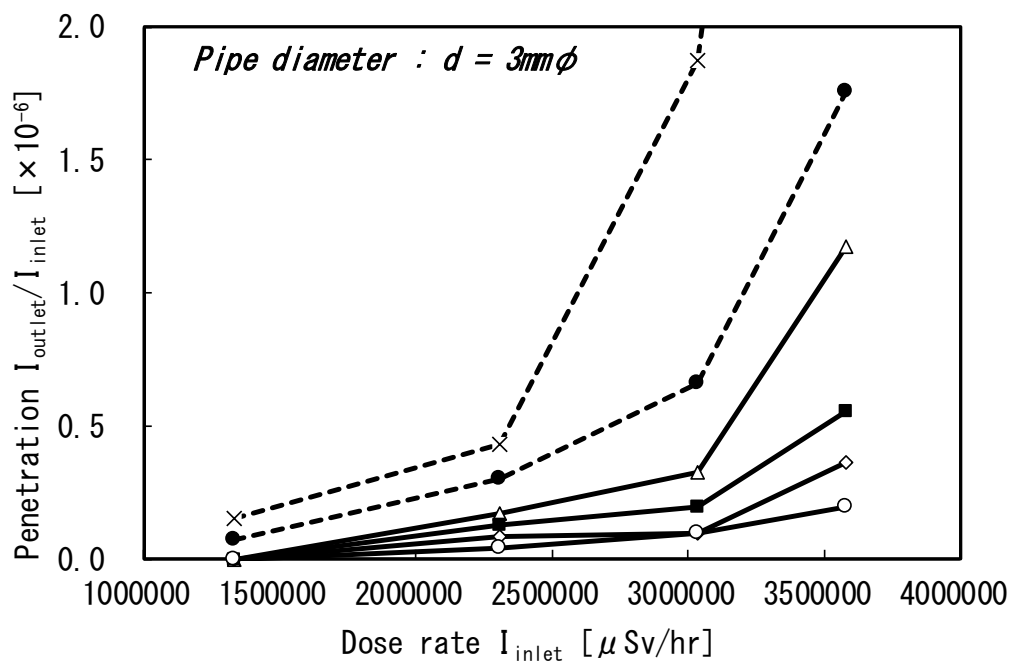


図 4.6 チャンバー内軟 X 線強度（入射線量率）と透過率（径：φ 3mm）

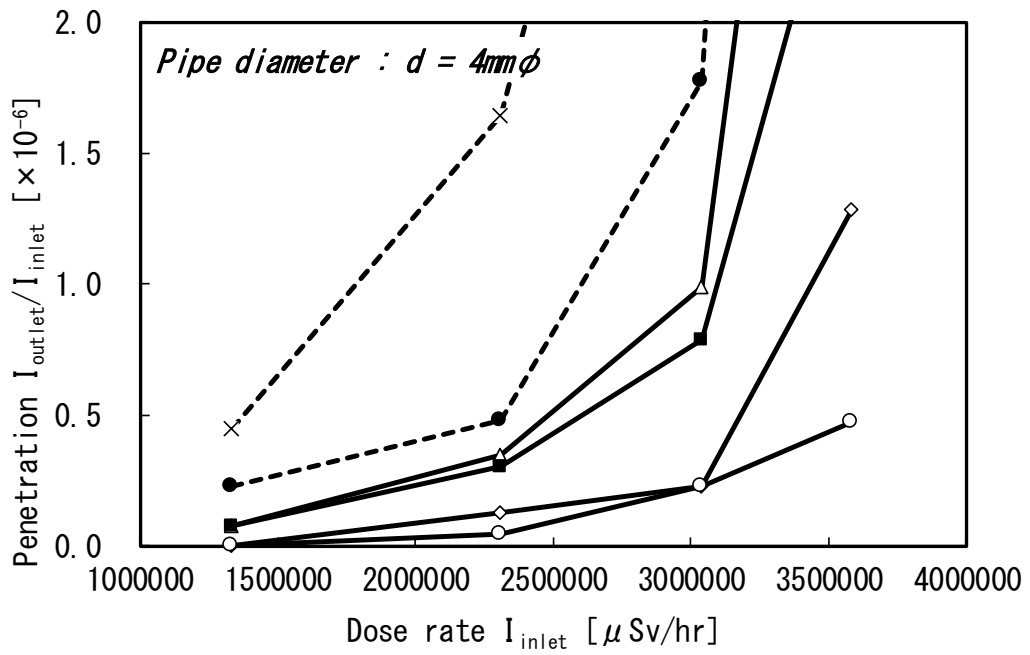


図 4.7 チャンバー内軟 X 線強度（入射線量率）と透過率（径： $\phi 4\text{mm}$ ）

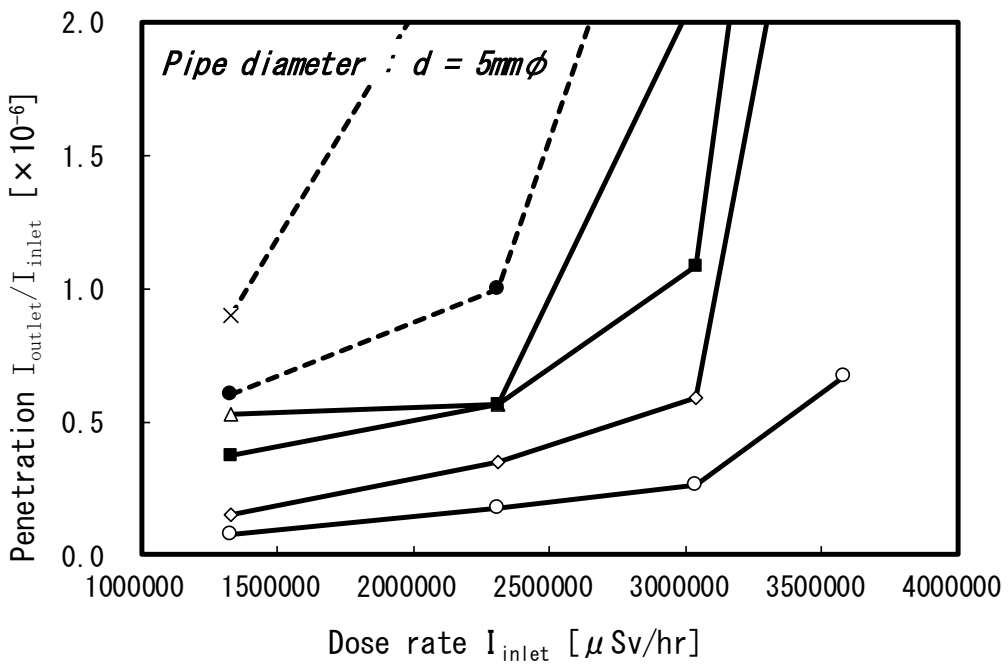


図 4.8 チャンバー内軟 X 線強度（入射線量率）と透過率（径： $\phi 5\text{mm}$ ）



### (3) 遮蔽構造の設計

次に、前項の金属パイプにおける軟 X 線の透過率のデータを用いて、軟 X 線の漏れ線量を  $1 \mu \text{ Sv/hr}$  以下にするための、多孔板の孔の孔径と板厚の設計を行った。

多孔板の孔を通過する前の軟 X 線強度を入射線量率  $I_{\text{inlet}}$ 、孔を透過してくる軟 X 線の漏れ線量率を透過線量率  $I_{\text{outlet}}$  とすると、その透過率は  $P = I_{\text{outlet}} / I_{\text{inlet}}$  で表される。多孔板からの軟 X 線の漏れ線量率を  $1 \mu \text{ Sv/hr}$  以下とするためには、 $I_{\text{outlet}} = 1 \mu \text{ Sv/hr}$  となる条件の孔（孔径、長さ）を、前項の金属パイプの透過率のデータから選定すれば良い。ここで、イオン化チャンバー内における、軟 X 線源から任意の距離の入射線量率  $I_{\text{inlet}}$  は、前述の軟 X 線源から任意の距離  $x$  における軟 X 線強度（空気中の減弱特性）から導いた 4.1 式を用いて計算する。

$$I_x = 4.0 \times 10^6 e^{-0.0055x} \quad (4.1)$$

また、透過線量率  $I_{\text{outlet}}$  が常に  $1 \mu \text{ Sv/hr}$  となる透過率を  $P_1$  とすると、 $P_1$  は 4.2 式のように求められる。

$$P_1 = I_{\text{outlet}} / I_{\text{inlet}} = 1 / I_x = 0.25 \times 10^{-6} e^{0.0055x} \quad (4.2)$$

次に、前項で透過率を求めた金属パイプのサンプルの中から、実際の多孔板の形状を考慮し、製作し易いように 4 種類の金属パイプ（パイプ a： $\phi 3\text{mm} \times 10\text{mmL}$ 、パイプ b： $\phi 3\text{mm} \times 20\text{mmL}$ 、パイプ c： $\phi 4\text{mm} \times 10\text{mmL}$ 、パイプ d： $\phi 4\text{mm} \times 20\text{mmL}$ ）を選択する。これらの金属パイプの、軟 X 線源から任意の距離における透過率を、それぞれ  $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 、 $P_d$  とすると、4.2 式に示す  $P_1$  と比較して、 $P_1 > P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 、 $P_d$  となる金属パイプを選定することで、透過線量率が常に  $1 \mu \text{ Sv/hr}$  以下となる。図 4.9 に  $P_1$  と  $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 、 $P_d$  の比較を示す。図 4.9 で、 $P_1$  を下回る金属パイプのうち、なるべく径が大きく、長さが短いものを選定することで、軟 X 線の漏れ線量率を抑える一方で、除電性能面でも有利となる。これより、パイプ b： $\phi 3\text{mm} \times 20\text{mmL}$ 、パイプ d： $\phi 4\text{mm} \times 20\text{mmL}$  を選定し、多孔板の孔の孔径を  $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、多孔板の板厚を  $20\text{mm}$  と決定した。設計した多孔板の詳細を図 4.10 に示す。多孔板

の孔は、軟 X 線源から水平距離で 50 mm 離し、照射部に近いエリアに  $\phi 3$  mm の孔を 20 mm ピッチで 20 個 (10 個  $\times$  2 列)、次いで  $\phi 4$  mm の孔を 20 mm ピッチで 18 個 (9 個  $\times$  2 列) 配した。板厚は 20mm、サイズを 430mm (W)  $\times$  130 mm (D) とした。実際の遮蔽性能としては、サーベイメータで軟 X 線の漏洩線量率を測定し、多孔板のいずれの位置に置いても  $1 \mu\text{Sv/hr}$  以下であることを確認した。

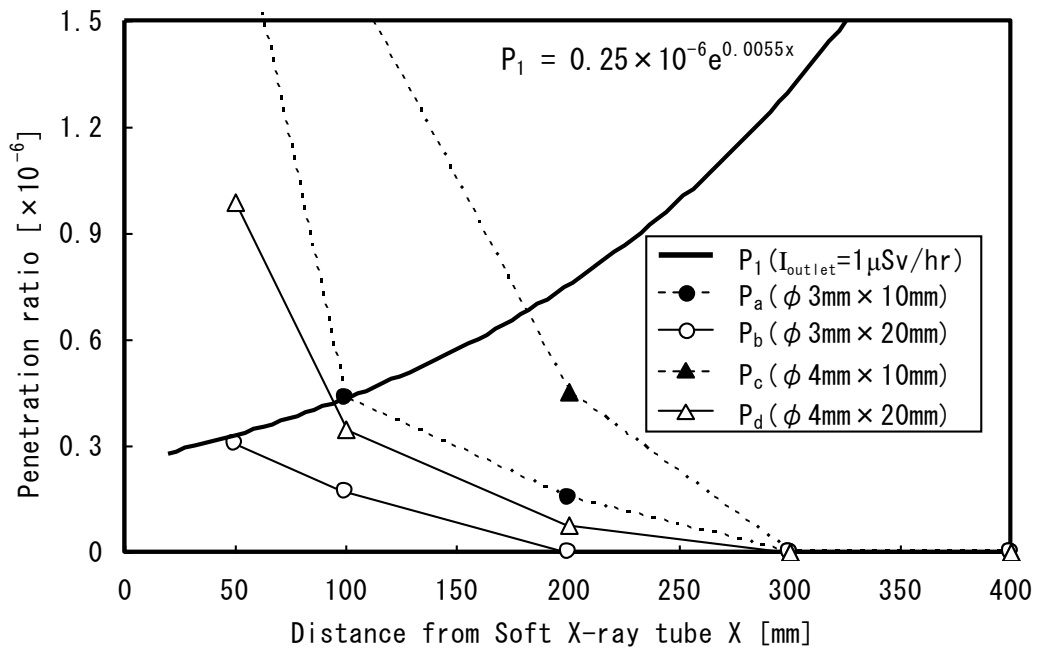


図 4.9  $P_1$  ( $I_{\text{outlet}}=1 \mu\text{Sv/hr}$ ) と  $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 、 $P_d$  (金属パイプ) の比較

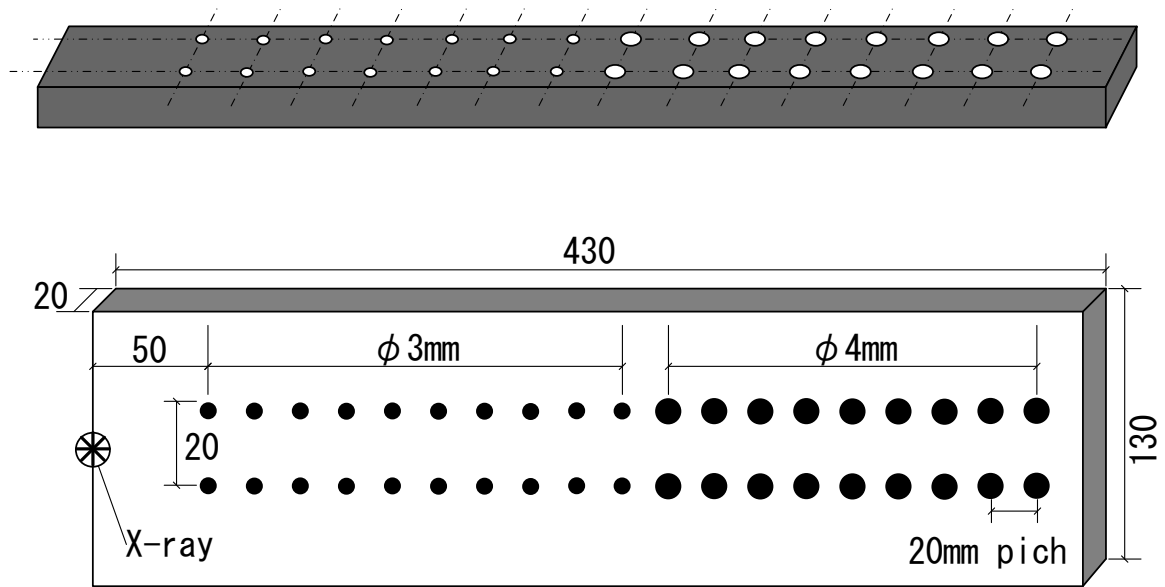


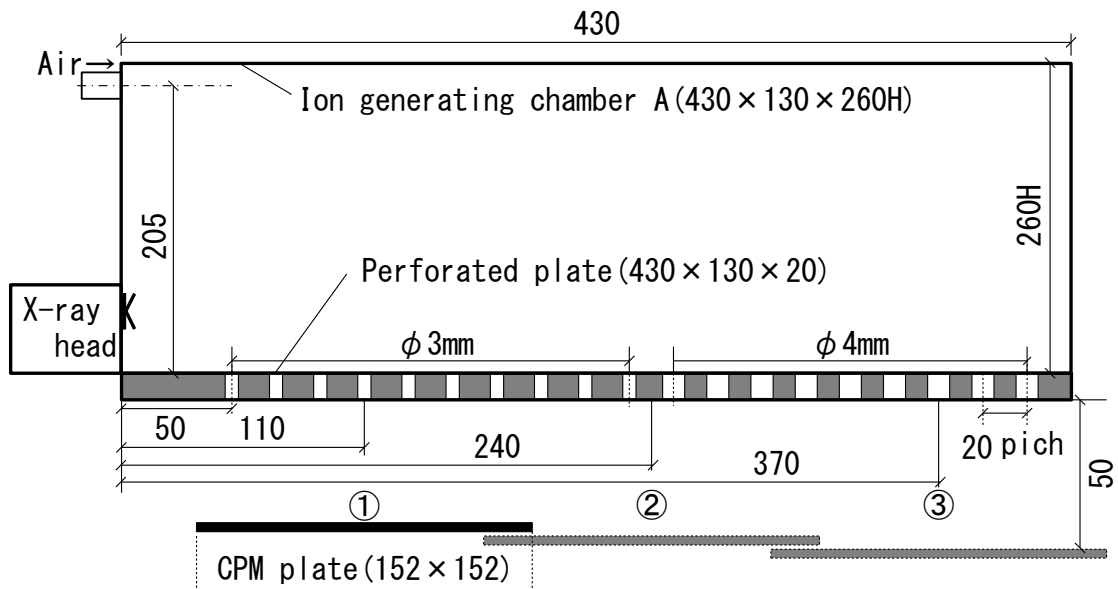
図 4.10 設計した多孔板の詳細

#### 4. 2. 2 除電性能に対する諸因子の影響

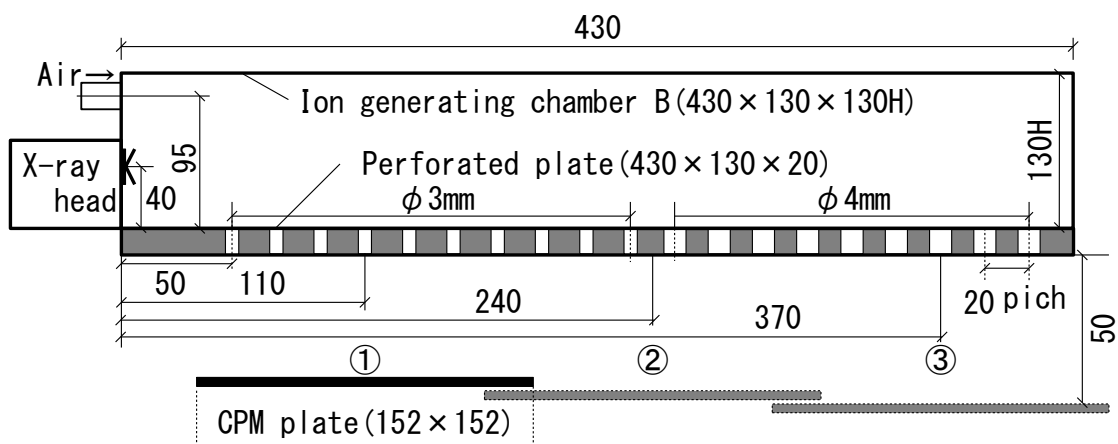
次に、設計した多孔板遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザーの除電性能について、除電性能を最適化することを目的として、諸因子が除電性能に与える影響を調査した。

##### (1) 実験装置および評価方法

実験装置の概略を図 4.11 に示す。設計した多孔板を吹出部とするイオン化チャンバーに軟 X 線ヘッドを取付け、チャンバー内をイオン化する。コンプレッサーからのエアーをイオン化チャンバーに供給し、多孔板の孔からイオン化エアーを吹出す。イオン化チャンバーは、容積の違いによる影響を見るため高さのみ異なる、チャンバーA (高さ 260 mm)、チャンバーB (高さ 130 mm) の 2 種類で評価を行った。供給エアー量はマスフローメーター (SMC 製 PF2A71) で計測した。除電性能は、帯電プレートモニタ (以下 CPM、Trek 製 Model 158) の金属プレート (152 mm×152 mm、20 pF±2 pF) を吹出部下方に設置し、+1 kV もしくは-1 kV に帯電させ、その初期電位が吹出部からのイオン化エアーによって十分の一の+0.1kV、もしくは-0.1kV まで減衰する時間 (除電時間) を測定して評価した。除電時間は短いほど、除電性能が優れていることを示す。また、金属プレートを正極性に帯電させた場合は、負イオンによる除電性能を、負極性の場合は、正イオンによる除電性能を評価したことを示す。測定点は吹出部下方 50 mm の位置で、軟 X 線照射部から水平距離が①110 mm ( $\phi$  3 mm の孔のエリア)、②240 mm ( $\phi$  3 mm と  $\phi$  4 mm の孔の混在エリア)、③370 mm ( $\phi$  4 mm の孔のエリア) の 3 箇所とし、CPM 金属プレートの中心が①~③となるように設置した。



(a) チャンバーA



(b) チャンバーB

図 4.11 実験装置の概略

## (2) 実験結果

### (2) - 1 供給エア一量が除電性能に与える影響

イオナイザーのイオン化チャンバーに供給するエア一量が除電性能に与える影響を検討するために、コンプレッサーからのエア一量を 100L/min、200L/min、300L/min と変化させた時の除電時間を測定した。図 4.12 に結果を示す。容積（高さ）の異なるチャンバーA、B 共に供給エア一量が多い程、全体的に除電時間は短縮し、除電性能が向上した。これは、供給するエア一量が多い程、イオン化チャンバー内で軟 X 線によりイオン化されたエア一の吹出量そのものが増加するためと考えられる。一方、供給エア一量に依らず、測定点①、②、③、つまりイオン化チャンバーの長手方向で除電時間に差が見られ、軟 X 線源に近い位置程除電性能が良い傾向、さらにチャンバーA と B では、容積の小さい（高さの低い）チャンバーB の方が除電性能が良い傾向が見られた、これらの傾向については、供給エア一量以外のパラメータの影響と考えられる。なお、ここに示す結果は、負イオンによる除電性能を示しているが、正イオンによる場合も同様の傾向を示した。

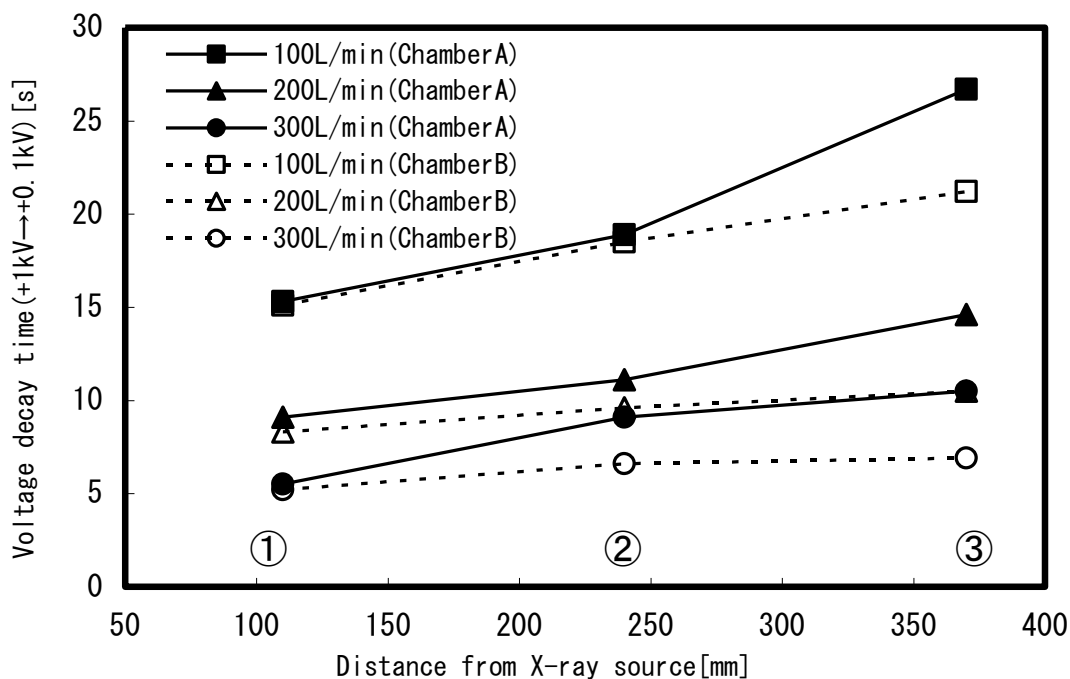


図 4.12 供給エア一量が除電性能に与える影響

## (2) - 2 イオン化チャンバー内の軟 X 線強度と

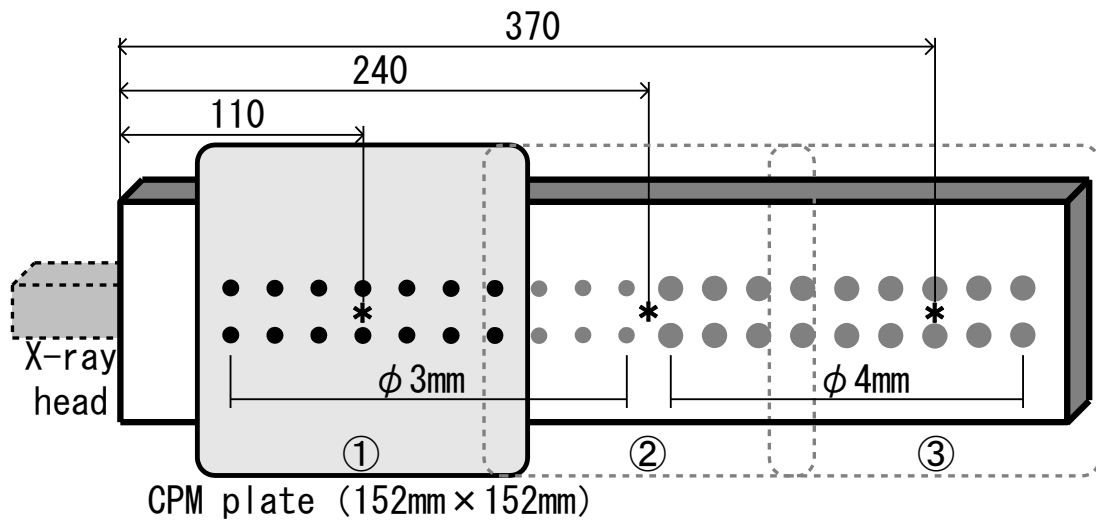
### イオン化エア一量の影響

前項 (2) - 1 で見られた傾向を踏まえ、次に、各測定点でのイオン化チャンバー内の軟 X 線の強度とイオン化エア一量（吹出部から吹出すエア一量）が、除電性能に与える影響を調査した。なお、イオン化チャンバー内の測定点①、②、③の位置の軟 X 線の強度についても、前述の、4.1 式を用いて線量率として算出した。測定点①、②、③の位置におけるイオン化エア一量は、図 4.13 に示すように、各測定点に CPM の金属プレートを設置した時に、CPM 金属プレート面積分のエリアにある多孔板の孔から吹出される風量と定義して測定した。測定点①の場合は、 $\phi 3\text{mm}$  の孔 14 個分、測定点②は、 $\phi 3\text{mm}$  の孔 8 個と  $\phi 4\text{mm}$  の孔 8 個分、測定点③は、 $\phi 4\text{mm}$  の孔 12 個分から吹出される風量となる。イオン化チャンバー内の軟 X 線強度と除電時間の関係を図 4.14 に、各測定点のイオン化エア一量と除電時間の関係を図 4.15 に示す。

図 4.14 に示すように、軟 X 線の線量率は、線源に近い程大きく、線源からの距離と共に急激に減衰し、軟 X 線線量率が最大の測定点①で最も除電時間が短く、線量率の減衰に伴い除電時間が長くなった。線源からの距離によってイオン化チャンバー内の軟 X 線強度が変化し、それによって生じるイオンの密度も変化するため、除電性能に影響を及ぼしたと考えられる。(2) - 1 で述べた、イオン化チャンバーの長手方向（測定点①、②、③）で除電性能に差が見られた原因として、このイオン化チャンバー内の軟 X 線強度が考えられる。

次に、図 4.15 に示す各測定点のイオン化エア一量は、チャンバー A、B とも、測定点①のエリアが最少、次いで測定点②のエリアが大きく、測定点③のエリアが最大となった。この相違は、測定点①が  $\phi 3\text{mm}$  の孔、測定点②が  $\phi 3\text{mm}$  と  $\phi 4\text{mm}$  の孔、測定点③が  $\phi 4\text{mm}$  の孔のエリアにあるため、その孔の抵抗の影響を受けた結果と考えられる。除電時間との関係を見ると、イオン化エア一量が最少の測定点①で除電時間が最も短く、イオン化エア一量が最大の測定点③で除電時間が最も長い結果となっている。これは、測定点①のイオン化エア一量が、測定点③のイオン化エア一量よりも、イオンの密度が高いことを示している。このことから、各測定点における除電性能には、その測定点のイオン化エア一量よりも、その測定点のイオン

化チャンバー内の軟 X 線強度の相違によるイオン密度の相違が影響していると考えられる。一方、チャンバー A と B の各測定点でのイオン化エア量を比較すると、どの測定点においてもほぼ等しいにも拘らず、(2) - 1 でも述べたように、チャンバー A と B の除電性能は、容積の小さい（高さの低い）チャンバー B の方が良い。同じ測定点では、イオン化チャンバー内の軟 X 線強度は等しいため、チャンバー A と B の除電性能の差は、軟 X 線の強度以外の要因で生じたイオン化チャンバー内のイオン密度の相違が影響したものと考えられる。



Measuring point ① :  $\phi 3\text{mm} \times 14$

Measuring point ② :  $\phi 3\text{mm} \times 8 + \phi 4\text{mm} \times 8$

Measuring point ③ :  $\phi 4\text{mm} \times 12$

図 4.13 各測定ポイントの孔の配置



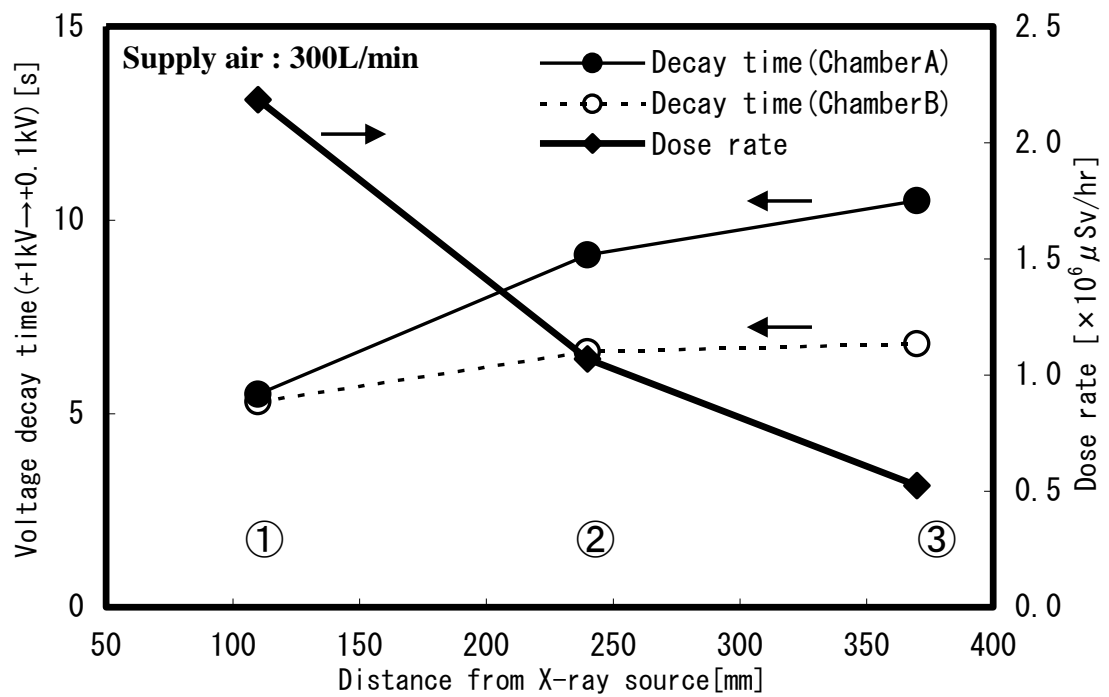


図 4.14 イオン化チャンバー内の軟 X 線強度と除電時間の関係

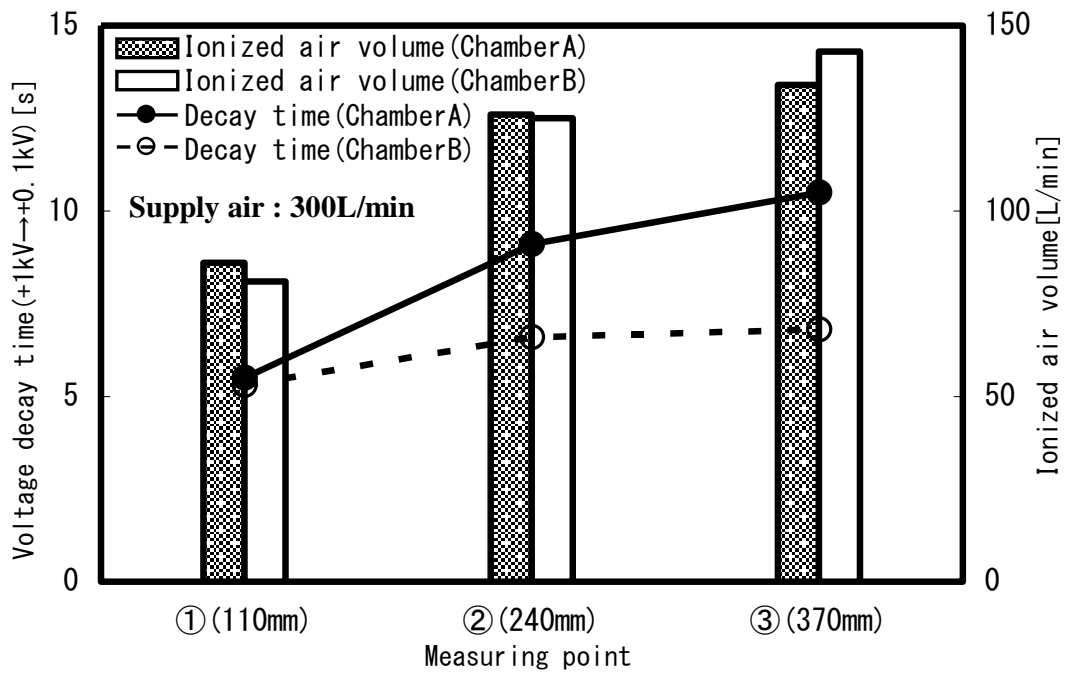


図 4.15 イオン化エア－量と除電時間の関係

### (2) - 3 イオン化チャンバー内気流性状の影響

軟 X 線の強度分布以外で、イオン化チャンバー内のイオン密度に差が生じる要因としては、イオン化チャンバー内の気流性状が考えられる。そこで、イオン化チャンバー内気流性状の影響を調べるため、イオン化チャンバーへのエア導入位置を変えて除電時間を測定した。エア導入位置は、図 4.16 に示すように、線源側からの導入位置を a (チャンバーA)、b (チャンバーB) として、それぞれの同一直線上の対面側を a' (チャンバーA)、b' (チャンバーB) とした。各測定点での除電時間を図 4.17 に、この時の各測定点のイオン化エア量の分布を図 4.18 に示す。

図 4.17 より、a' と b' からエアを導入した場合には、元の導入位置の a と b からエアを導入した場合と比べて、全ての測定点で除電時間が短縮した。一方、図 4.18 に示すように、a' と b' からエアを導入した場合の各測定点でのイオン化エア量は、(2) - 2 の図 4.15 で示した、元のエア導入位置 (a、b) でのイオン化エア量とほぼ同じ分布となった。エア導入位置を変えた場合でも、吹出部である多孔板の孔の抵抗によって、各測定点のイオン化エア量の分布自体は変わらないが、エア導入位置が変わったことでイオン化チャンバー内の気流性状が変化したため、各測定点のイオン化エア中のイオン密度が高くなり、除電性能が向上したと考えられる。またこれは、(2) - 1 で見られた、容積の異なるチャンバーAとBの除電性能に差が現れる傾向の原因の一つでもあり、チャンバー容積の違い(高さの違い)でチャンバー内の気流性状が異なり、各測定点のイオン化エア中のイオン密度に差が生じたためと考えられる。

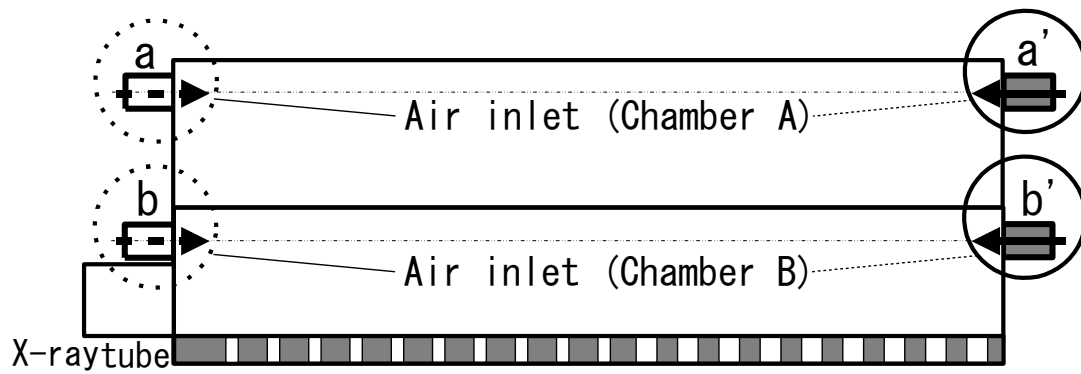


図 4.16 チャンバーA、Bにおけるエア－導入位置

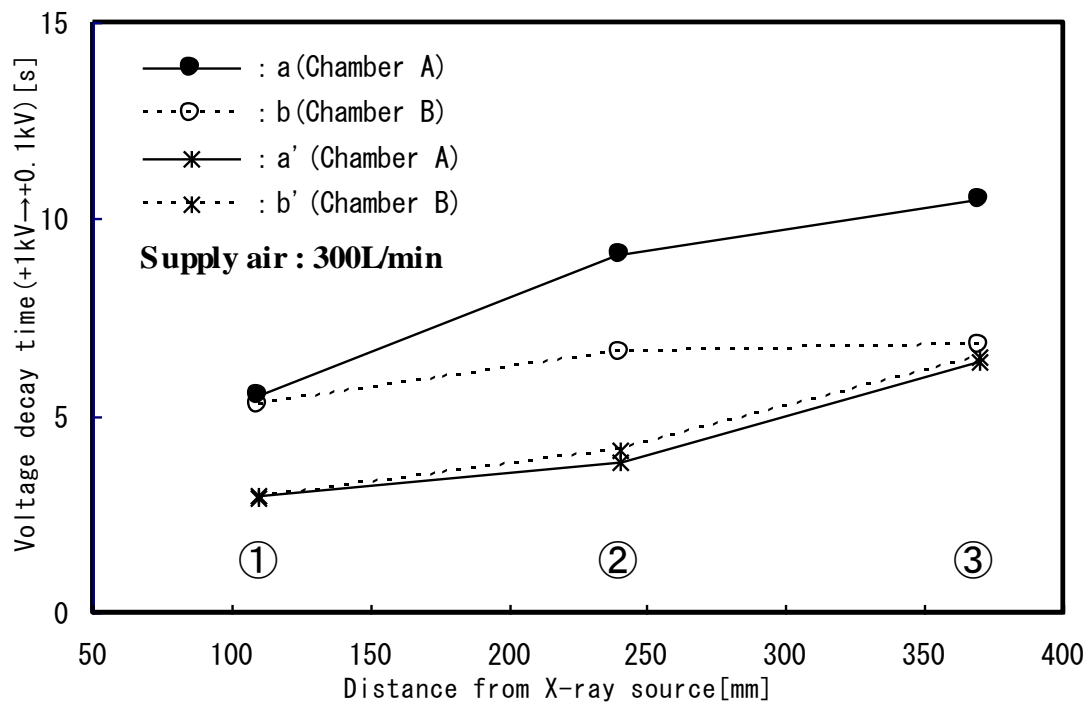


図 4.17 エア－導入位置が除電性能に与える影響

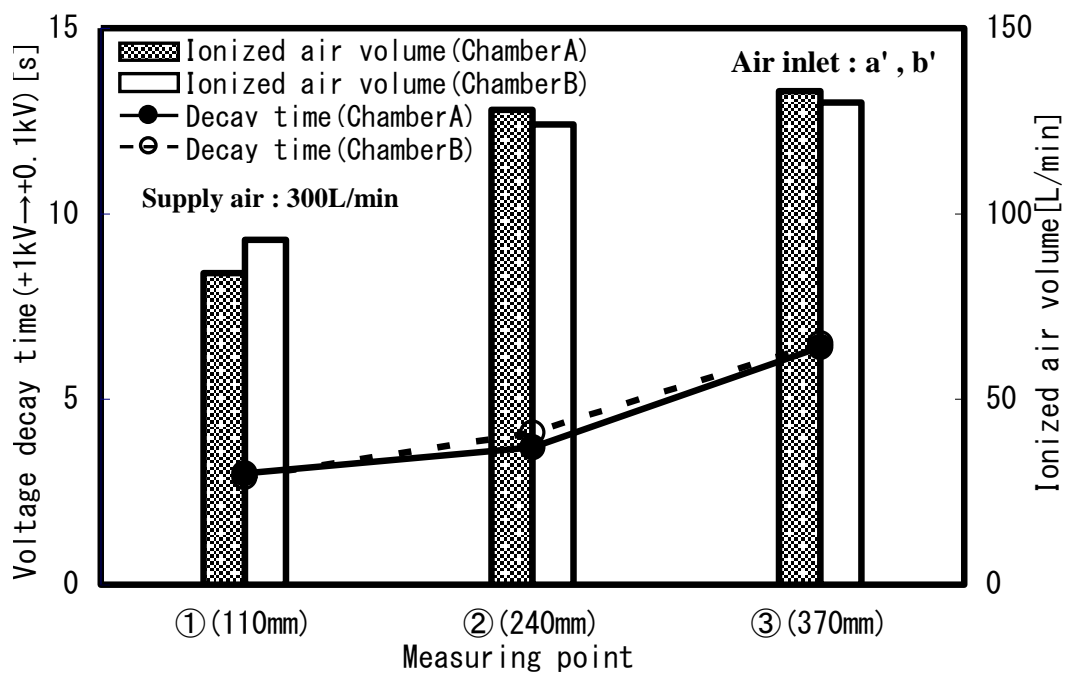
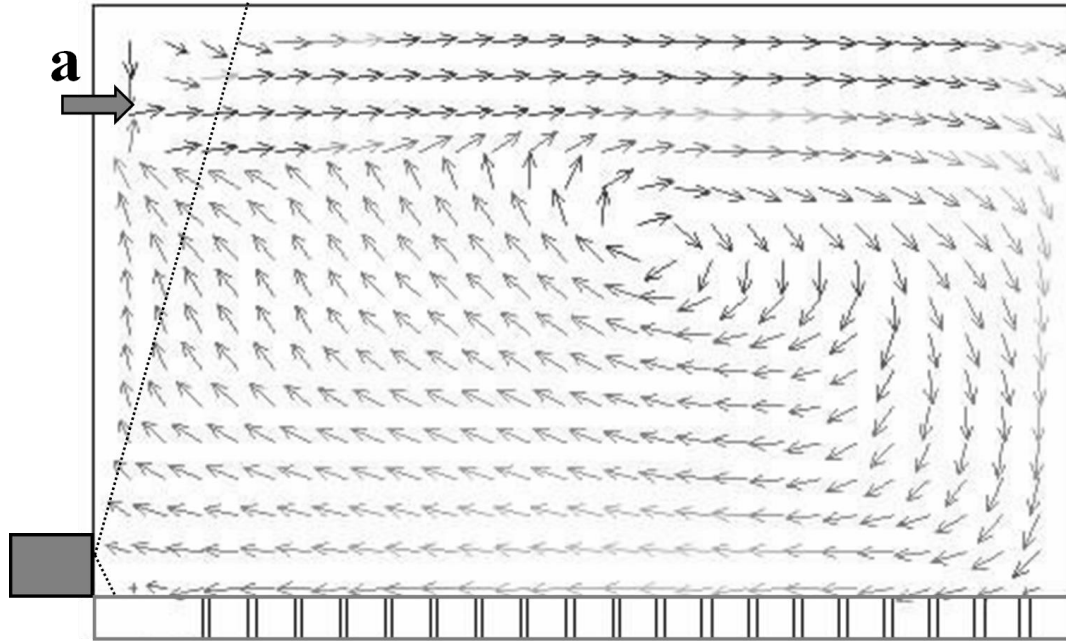
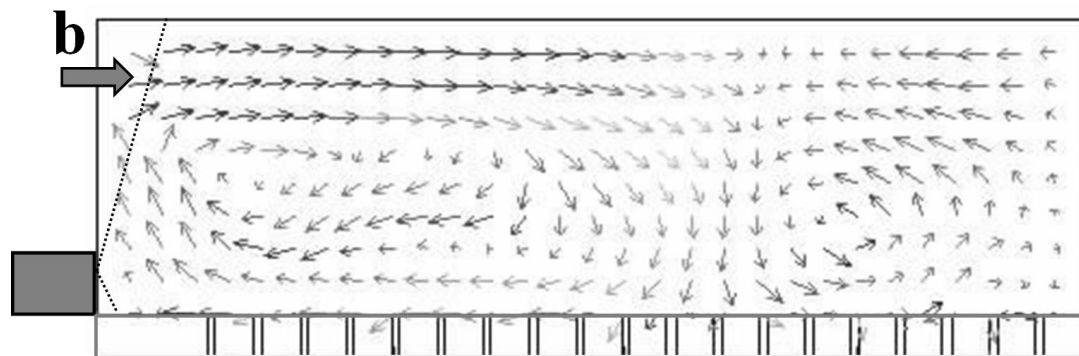


図 4.18 イオン化エア一量と除電性能の関係 (エア一導入 a'、b')

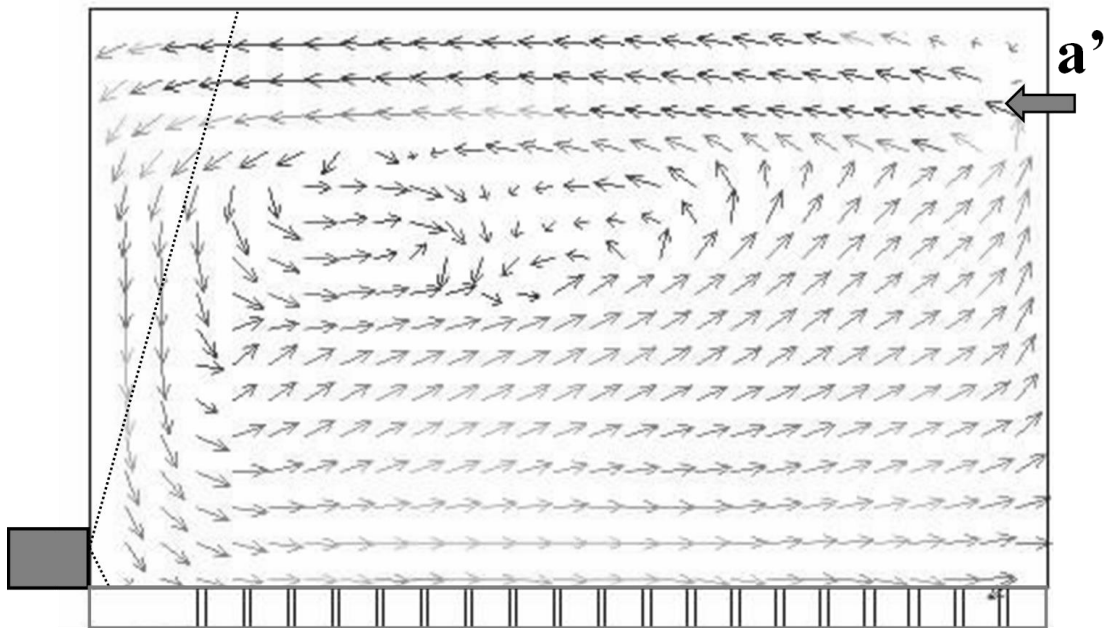
これらを確認するために、エアアの導入位置やチャンバー容積（高さ）を変えた場合のイオン化チャンバー内の気流性状について、気流シミュレーションを行った。計算対象のチャンバー形状、エアア導入位置、吹出部の多孔板の孔径、孔ピッチの条件は、除電性能測定に用いた実験装置と同様とした。また、エアア導入位置から 300 L/min で給気を与え、多孔板の孔から吹出した気流は自然流出するものとし、電界や温度については考慮しない。計算に用いたソフトは SCRYU/Tetra（クレイドル社）、メッシュシステムに非構造格子、計算方法に SIMPLE 法、乱流モデルに  $K-\epsilon$  モデル、対象流体を非圧縮性流体として計算を行った。各パターンでのイオン化チャンバー内の気流性状の断面を図 4.19 に示す。元の導入位置である a（チャンバーA）と b（チャンバーB）からエアアを導入した場合は、線源側の軟 X 線強度の強いエリアでイオン化された気流が、反対側の軟 X 線強度の弱いエリアに向かって流れ、吹出部に向かって下降し、イオン化チャンバー外へ搬送される動きとなっている。この経路を辿る間に生成したイオンの再結合が促進し、イオン密度が低下していることが考えられる。一方 a'（チャンバーA）と b'（チャンバーB）からエアアを導入した場合は、軟 X 線強度の強いエリアに向かって気流が流れ、線源近傍の最も軟 X 線強度の強いエリアでイオン化され、直後に吹出部に到達している。イオン化されてから吹出部に到達するまでの経路が短いため、イオン密度が高い状態のままチャンバー外に搬送されていることが考えられる。供給エアアの導入位置によってイオン密度（除電性能）に差が生じるのは、こうした気流性状の影響と考えられる。次に、容積の異なる（高さの異なる）チャンバーAとBについて見ると、元の導入位置 a、b からエアアを導入した場合、容積が小さいチャンバーBは、チャンバーAよりも高さが低く、エアア導入位置と線源との距離がチャンバーAより短い。従って、b から導入したエアアは、a から導入したエアアよりも軟 X 線強度のより強い位置を通過するため、イオン密度が高くなる。一方、対面側の a'、b' から導入したエアアは、どちらも線源近傍でイオン化された直後に吹出部に到達し、チャンバー外までのイオン化エアアが辿る経路に差が無い。従って、イオン化エアアのイオン密度にも差が無く、除電性能がほぼ等しくなる。チャンバーの容積、すなわちチャンバーの高さによってもイオン密度（除電性能）に差が生じるのはこのためと考えられる。



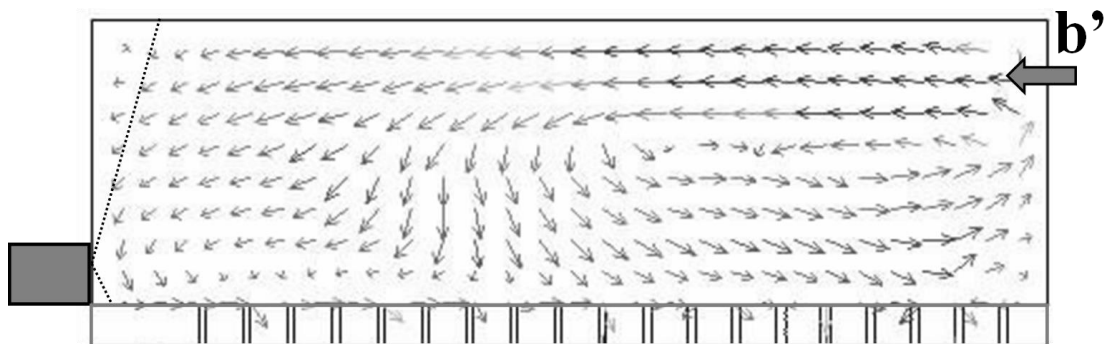
(a) エアー導入位置 a (チャンバーA)



(b) エアー導入位置 b (チャンバーB)



(c) エアー導入位置 a' (チャンバーA)



(d) エアー導入位置 b' (チャンバーB)

図 4.19 イオン化チャンバー内の気流性状



#### 4. 3 粗大化イオンのチューブ搬送型軟 X 線イオナイザー

軟 X 線イオナイザーの除電性能が優れる理由としては、軟 X 線が照射されたエリアにおいて、除電対象近傍の雰囲気を瞬時に電離し、高濃度のイオンを生成できることにある。ところが、生産装置内の狭小部などでは軟 X 線イオナイザーの設置スペースを確保することが困難で、効果的に対象を除電できる位置にイオナイザーを設置できない問題があった。そこで、除電箇所と別の場所で軟 X 線により生成した正負のイオンを、チューブで除電対象近傍まで搬送して除電するタイプのイオナイザーの開発を行ってきた<sup>8)</sup>。しかし、イオンをチューブ搬送する場合には、単極イオンであっても、正負のイオン対であっても、搬送中にイオン量が急速に減少することが問題となっていた<sup>8)</sup>。これは、静電拡散やイオン対の再結合により正負イオンが消耗してしまうことが原因で、図 4.20<sup>9)</sup> に示すように、初期濃度が約  $10^9/\text{cm}^3$  のときの単極イオン、正負イオン対のイオン濃度は、1 秒以内に 3 桁以上減少することがわかる。この主な原因は、4.3 式<sup>9)</sup> で表される、イオンの電氣的移動度が速いことである。イオンに限らず、荷電粒子の電氣的移動度は、図 4.21<sup>9)</sup> に示すようにその粒径に依存する。図 4.21 では、粒径が 10 倍になると、電氣的移動度はおよそ 1/100 になっており、粒径が大きいほど電氣的移動度は小さくなっている。ここで、通常の前負イオン（小イオン：直径約 1nm）の電氣的移動度はそれぞれ、 $1.3\text{cm}^2/\text{sec}/\text{V}$ 、 $1.6\text{cm}^2/\text{sec}/\text{V}^{10)$  である。一方、図 4.21 から、 $0.1\mu\text{m}$  程度の荷電粒子の電氣的移動度は  $10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}/\text{V}$  程度と読み取れる。よって、通常の前負イオンを  $0.1\mu\text{m}$  程度に粗大化した場合には、およそ 1/10000 まで移動度を小さくできることになる。このことから、イオンを粗大化することで電氣的移動度を抑え、チューブ搬送することが可能になると思われる。そこで、軟 X 線で生成したイオンを粗大化して電氣的移動度小さくし、イオンの消耗を抑えてチューブ搬送する方式のイオナイザーを考案した。図 4.22 に、考案した、粗大化イオンのチューブ搬送式軟 X 線イオナイザーの概略を示す。これは、チャンバー内で軟 X 線を照射して正負イオンを生成し、その正負イオンを核に水蒸気を凝縮させて粗大化し、チューブ搬送するものである。

ここで、水蒸気を凝縮させて粗大化させたイオンの粒径については、およそ  $0.025\mu\text{m}$  を目標としている。これは、直径が約  $0.3\text{nm}^{11)$  の水分子が通常

の正負イオン（1nm）の表面にまんべんなく層状に吸着して粗大化すると仮定して、40層の水分子がイオンに吸着した場合の粒径である。40層分の水分子が吸着すると仮定した根拠としては、金属表面における水分子の吸着層数は相対湿度の影響を受け、相対湿度100%の環境下では20層<sup>12)</sup>から40層<sup>13)</sup>程度という報告に基づいている。図4.21を見ると、0.001 $\mu\text{m}$ （1nm）の粒子が0.025 $\mu\text{m}$ 程度になると、電気的移動度は1/1000程度まで小さくなっていることから、粗大化による効果をイオナイザーとしての除電時間の測定によって評価した。

$$v = B_e E \quad (4.3)^9)$$

$B_e$  : 粒子の電氣的移動度 [ $\text{cm}^2/\text{sec}/\text{V}$ ]

$v$  : 粒子の速度 [ $\text{cm}/\text{sec}$ ]

$E$  : 電場の強さ [ $\text{V}/\text{cm}$ ]

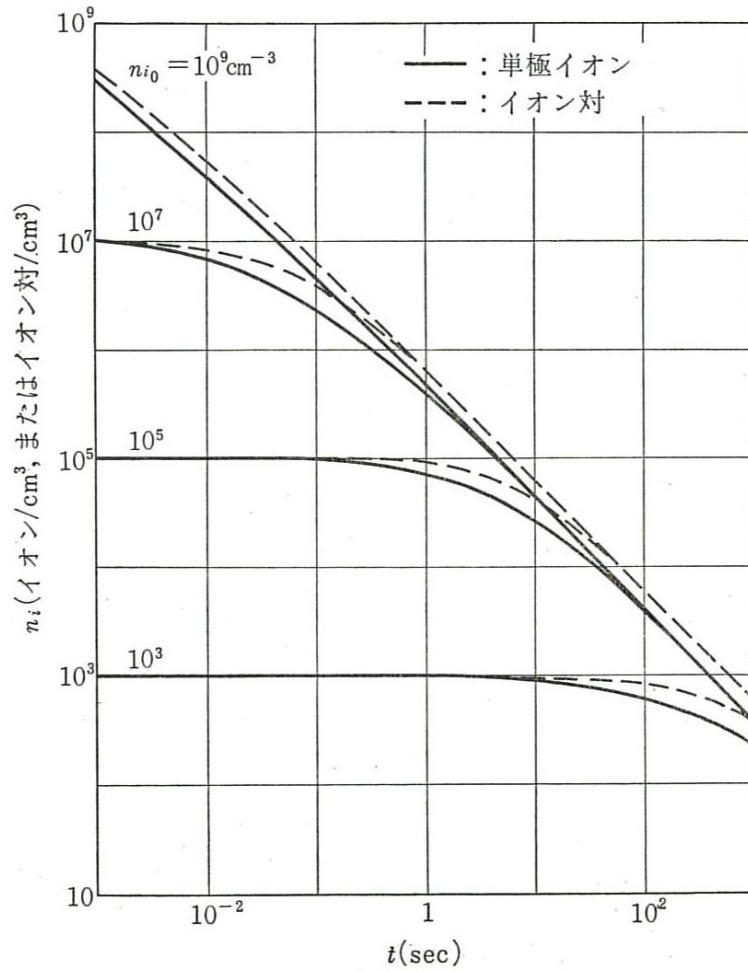


図 4.20 イオンの消滅<sup>9)</sup>

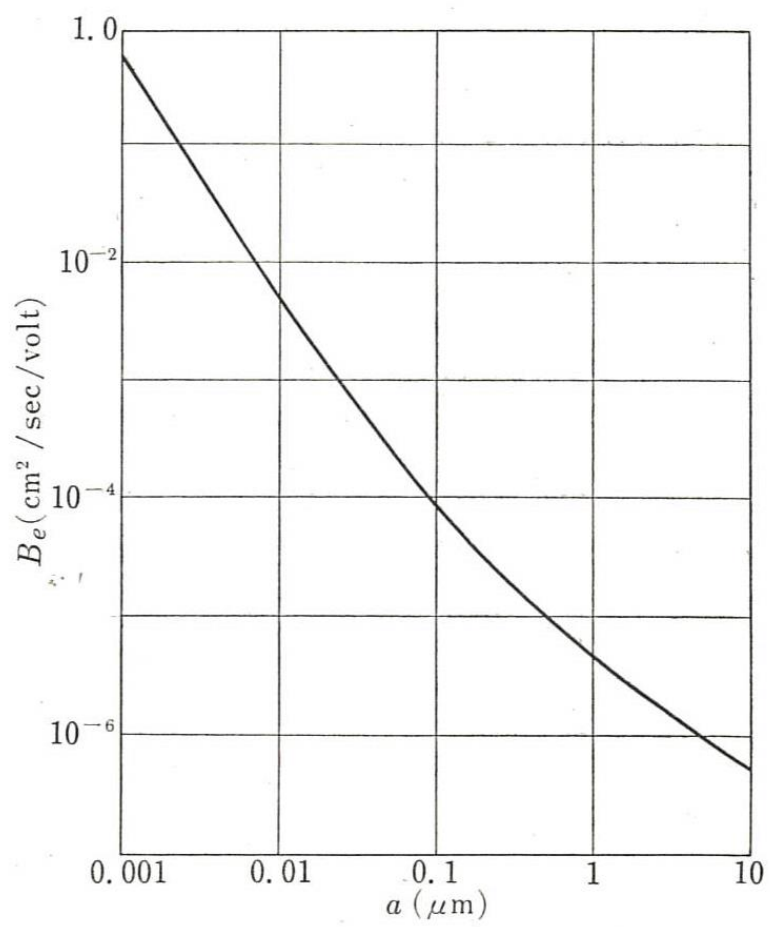


図 4.21 単位電荷を有する粒子の電氣的移動度<sup>9)</sup>

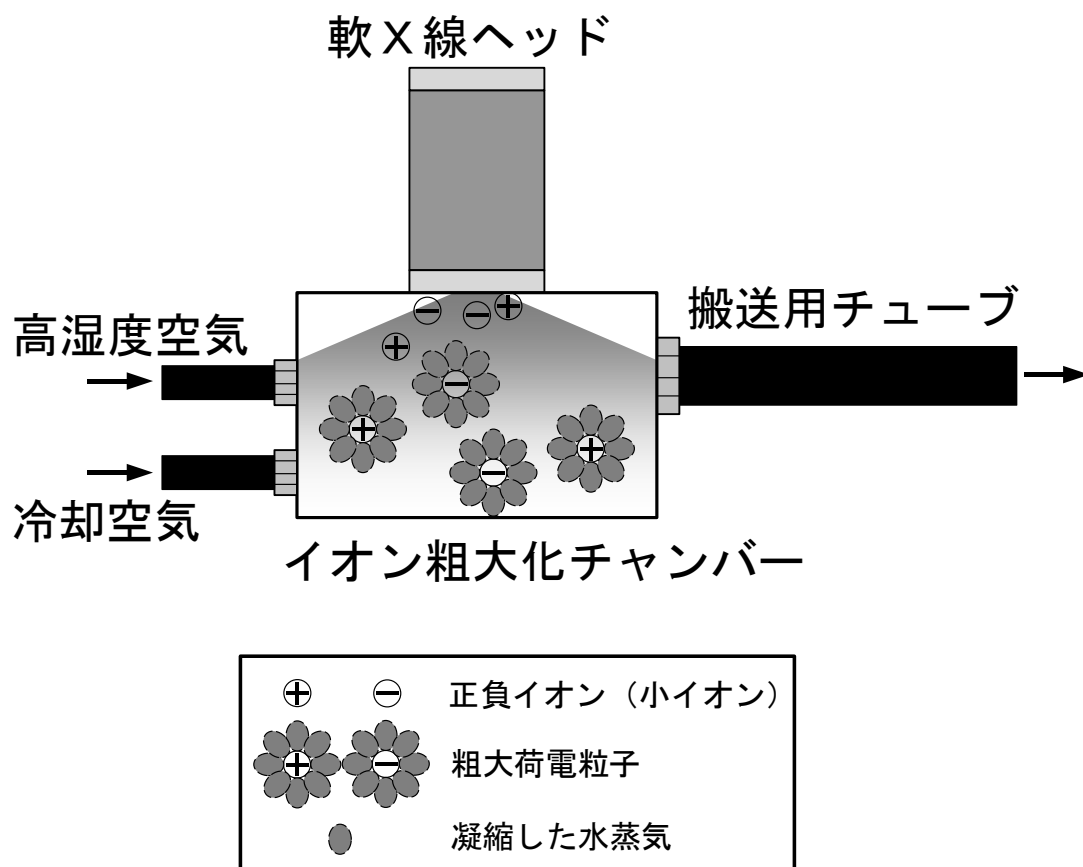


図 4.22 粗大化イオンのチューブ搬送式軟 X 線イオナイザーの概略

#### 4. 3. 1 水蒸気の凝縮を利用したイオンの粗大化

イオンの粗大化は、水蒸気の凝縮を利用する。生成した正負イオンを核として、イオンの周囲に冷却されて凝縮した水蒸気の粒子を成長させて、粗大荷電粒子とする。イオン粗大化のための水蒸気の凝縮には、高湿度の空気と冷却空気が必要となる。高湿度空気の生成は純水のバブリングによって行った。冷却空気の生成には、チラーなどの設備を用いることなく簡単に冷却空気を発生させるために、ボルテックスチューブを利用した。図 4.23 にボルテックスチューブの概略を示す。ボルテックスチューブに圧縮空気を導入すると、高圧チャンバー内に設置されたゼネレータから高温管内壁面に沿う方向に噴射され、旋回流を生じながら調節バルブまで到達する。ここで、一部は高温排気として排出され、残りは旋回流の中心へと押し戻され、外側とは進行方向が反対の冷却空気出口へ向かう旋回流が発生する。このとき、内外の旋回流で熱交換が行われ、外側の旋回流は加熱され、内側の旋回流は冷却される。これをボルテックス効果という<sup>14)</sup>。また、図 4.24 に本実験で用いたボルテックスチューブの出入口冷却温度差と冷却空気量との関係を示す。これより、入口圧力と調節バルブにて冷却空気量を調節することにより、冷却空気温度を任意に変更可能であることがわかる。

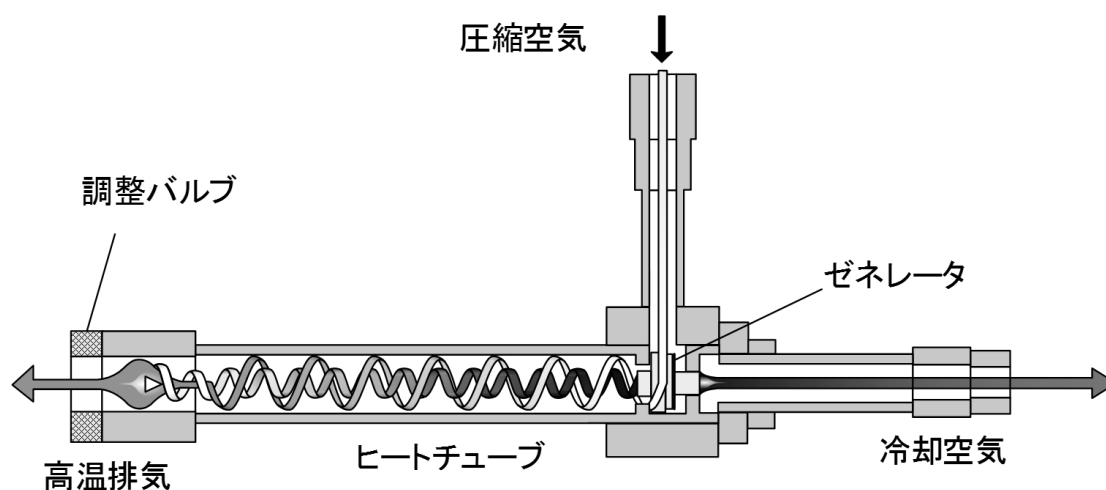


図 4.23 ボルテックスチューブの概略

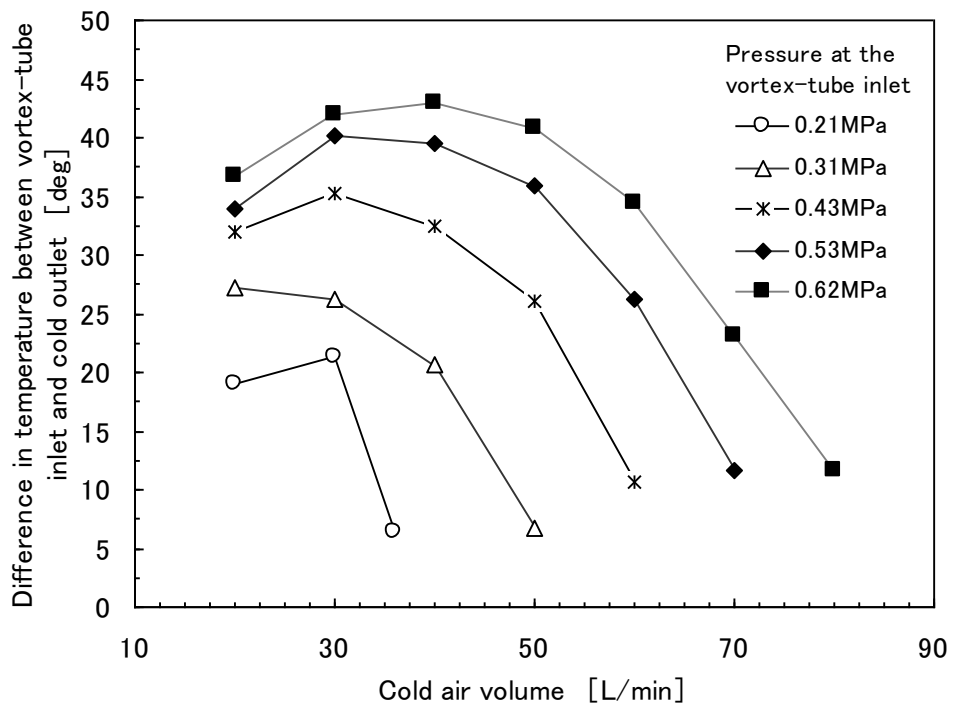


図 4.24 ボルテックスチューブの出入口冷却温度差と冷却空気量との関係

#### 4. 3. 2 除電性能に対する諸因子の影響

次に、考案した粗大化イオンのチューブ搬送式軟 X 線イオナイザーの除電性能について、除電性能を最適化することを目的として、諸因子が除電性能に与える影響を調査した。

##### (1) 実験装置および評価方法

実験装置の概略を図 4.25 に示す。コンプレッサーからの圧縮空気は一部を加湿用に、残りを冷却用に用いる。加湿用空気は、純水バブラー（ $\phi$  100mm $\times$ 700mmH、純水水位 350mmH）を通過して加湿された後に、荷電粒子生成チャンバ（120mm $\times$ 55mm $\times$ 75mmH）へ圧送される。一方、残りの冷却用空気は、減圧弁を通り 0.4MPa $\sim$ 0.6MPa でボルテックスチューブ（虹技製モデル 116）へと送られ、一部を高温排気として排出した後、冷却空気として荷電粒子生成チャンバへと導入される。荷電粒子生成チャンバは、加湿空気の導入方法を評価するために、図 4.26 に示すように、直吹型およびシースノズル型の 2 種類を使用した。シースノズルは、図 4.27 のように二重管構造となっており、外側に冷却空気、内側に加湿空気が導入され、冷却空気と加湿空気を同心円状にすることで、局所的な高湿度状態を保ったままチャンバ内へ噴き出す効果を狙った構造となっている。荷電粒子生成チャンバにて生成した荷電粒子は気流と共に、搬送管（ $\phi$  20mm $\times$ 535mmL、塩化ビニール製）を通り、搬送管末端より 10mm 離れた場所に設置した帯電プレートモニタに吹き付けられる。加湿空気の温度および相対湿度は、荷電粒子生成チャンバ手前に設置した温湿度センサ（T&D 製 TR-72U）にて測定した。また、ボルテックスチューブ入口圧力は、圧力変換器（長野計器製 type KH15）により、冷却空気および加湿空気風量はマスフローメータ（SMC 製 PF2A721）により計測した。

除電性能は、生成した荷電粒子を含むエアーを帯電プレートモニタ（Trek Model 158、金属プレート 15.2 $\times$ 15.2cm、20pF $\pm$ 2pF）の金属プレートに吹き付け、 $\pm$ 1000V $\rightarrow$  $\pm$ 100V の除電時間を測定して評価した。除電時間が短いほど除電性能が優れていることを示している。



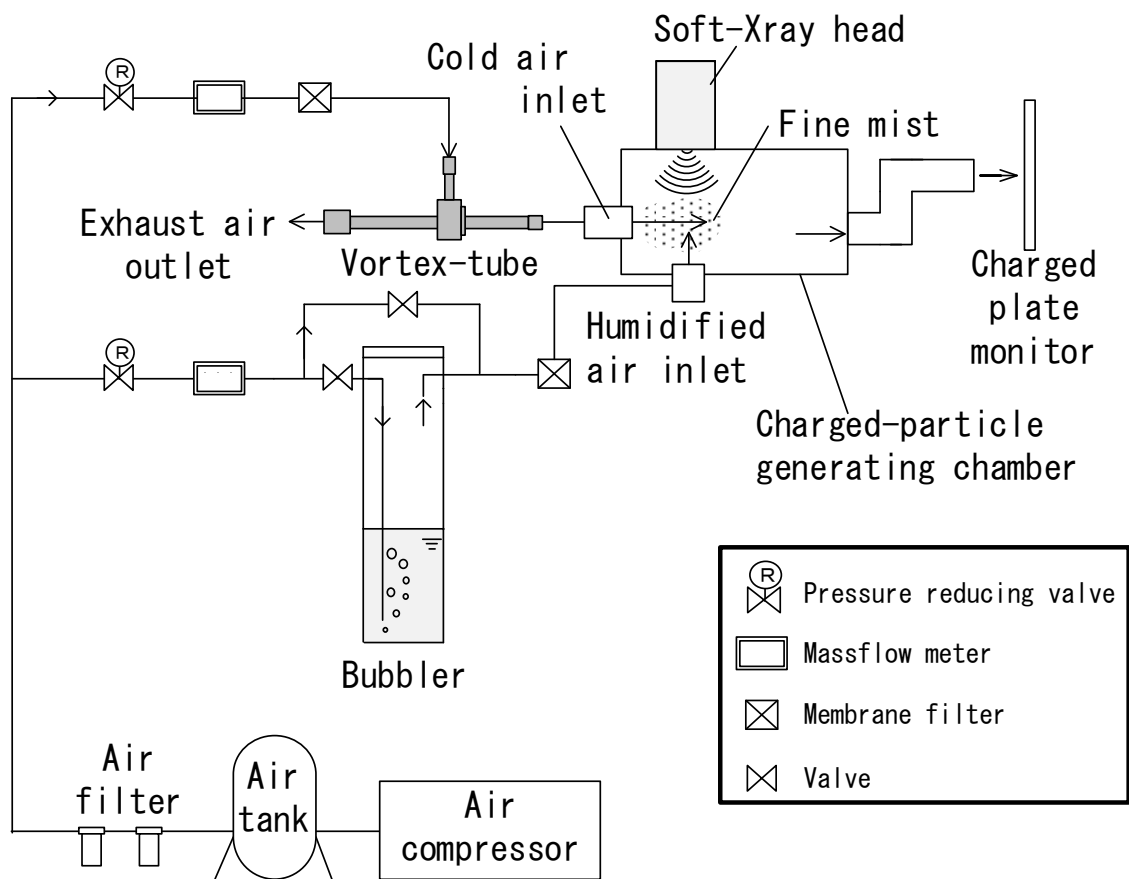
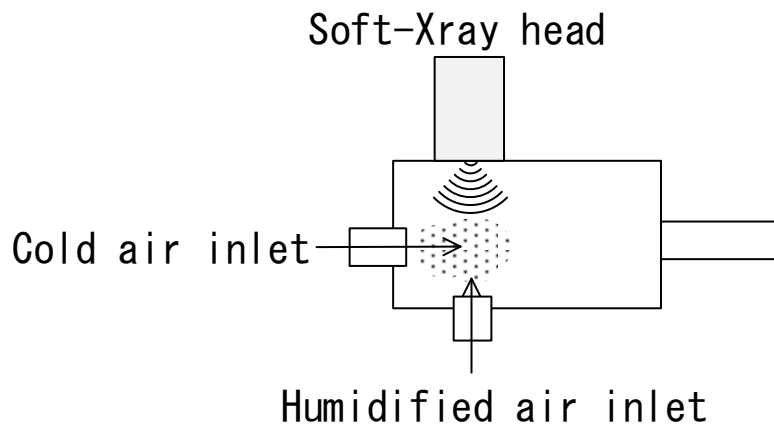
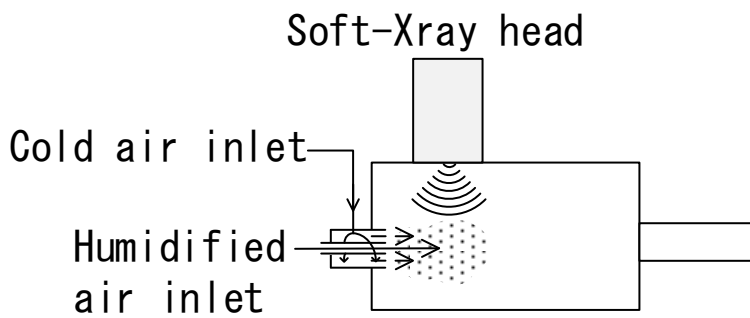


図 4.25 実験装置の概略



(a) 加湿空気直吹型チャンバー



(b) 加湿空気シースノズル型チャンバー

図 4.26 荷電粒子生成チャンバーの構造 (2種類)

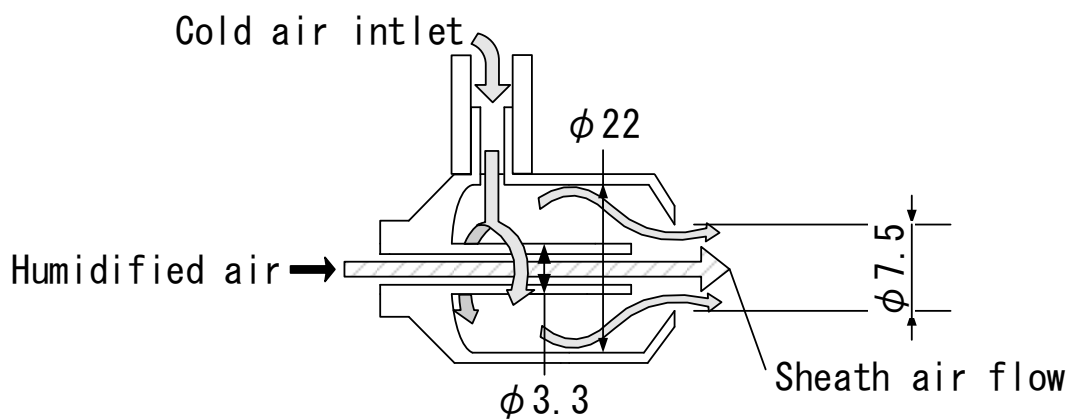


図 4.27 シースノズルの構造

## (2) 実験結果

### (2) - 1 加湿空気導入方法が除電性能に与える影響

冷却空気量 ( $V_c$ ) と加湿空気量 ( $V_h$ ) との合計風量 ( $V_t$ ) の除電時間への影響を図 4.28 に示す。図中の実線は、冷却風量を 0 L/min として、加湿空気吹出口へ、コンプレッサーからの圧縮空気を大気開放した状態の温湿度が、20°C、10%の空気を基準空気として導入した場合、つまり粗大化させないイオンのみの除電性能を示している。図のようにシースノズルを用いると直吹型の場合に比べ除電性能が良い結果となった。これは、シースノズルを用いると、加湿空気が冷却空気に包まれているため接触時間が長くなると同時に、加湿空気のチャンバー内への拡散による湿度低下を防止でき、荷電粒子が生成され易いためであると考えられる。また、直吹型およびシースノズル型の場合のどちらにおいても、粗大化させないイオンのみ（基準空気）に比べ除電性能が悪い結果となった。これは、冷却空気量に比べ加湿空気量が多いため、加湿空気中の水蒸気がチャンバー内壁や軟 X 線イオナイザーの照射窓上で結露したことが原因であると考えられる。軟 X 線照射窓上に結露した水蒸気の薄い水膜が生じると、照射される軟 X 線の線量が減少し、除電性能が著しく低下する（50  $\mu$ m の水膜によって軟 X 線の照射出力は 1/3 程度に減衰する<sup>15)</sup>）。この結果から、シースノズル型でイオンを粗大化した場合、直吹型と比較して除電性能向上に有効ではあるが、本構造ではイオンのみ（粗大化させない場合）の除電性能を上回ることができず、改善が必要であることがわかる。対策としては、軟 X 線イオナイザーの照射窓付近を冷却された加湿空気から保護すること、冷却空気量と加湿空気量の比を最適化し、シースエアによる局所的な高湿度状態を維持することが考えられる。

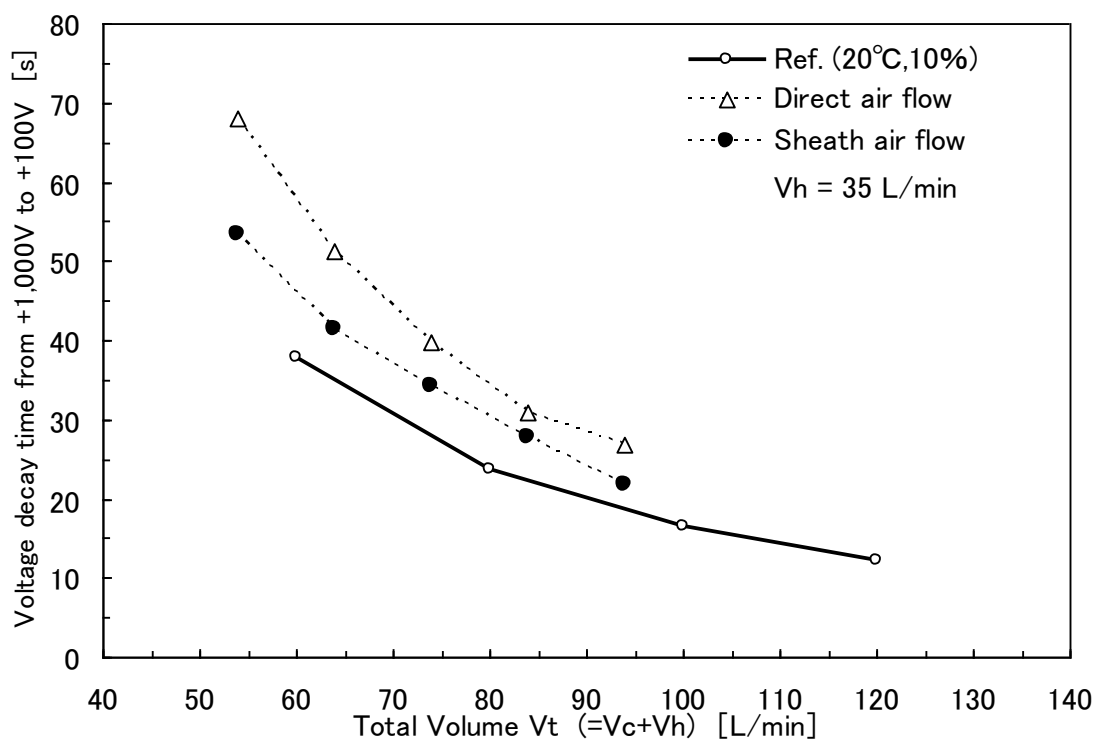


図 4.28 冷却空気量と加湿空気量の合計供給空気量の除電時間への影響

## (2) - 2 パージ空気の有無の影響

軟 X 線イオナイザーの照射窓上の結露を防ぐために、チャンバーの冷却空気および加湿空気吹出口設置部の上部にパージ用空気吹出口を設置し、照射窓周辺をパージする対策を行った。実験装置を図 4.29 に示す。なお、加湿空気の導入方法は、シースノズル型チャンバーを用いている。パージ空気量  $V_p$  を 25 L/min で一定とし、冷却空気量や加湿空気量を変化させた場合の合計風量  $V_{t'}$  ( $=V_p+V_c+V_h$ ) の除電時間への影響を図 4.30 に示す。冷却空気はボルテックスチューブの調節バルブ開度を一定とし、入口供給圧力を調節することにより風量を変化させた。図中の実線は、イオンのみ（基準空気）の場合の結果を示している。図より、パージエアを導入した場合の除電時間は、イオンのみの場合と同等か若干短い結果となった。これは、軟 X 線イオナイザーの照射窓付近をパージしたことにより、照射窓の結露を防止した効果が現れたと思われる。また、若干ではあるが、冷却空気により加湿空気中の水蒸気がチャンバー内のイオンを核として凝縮し、粗大荷電粒子が発生した可能性があり、それにより僅かに除電性能が向上したと考えられる。また、相対湿度は高いほど、同じ相対湿度の場合では加湿空気量が少ない方ほど、除電性能が優れている結果となった。これは、相対湿度が高い方が絶対湿度が高いため、より多くの水蒸気が凝縮し荷電粒子が生成されるが、加湿空気量が一定以上増えるとシースエアが破れ、冷却空気に包まれていた高温度の加湿空気がチャンバー内に拡散し、シースエア内の湿度が低下したためと考えられる。

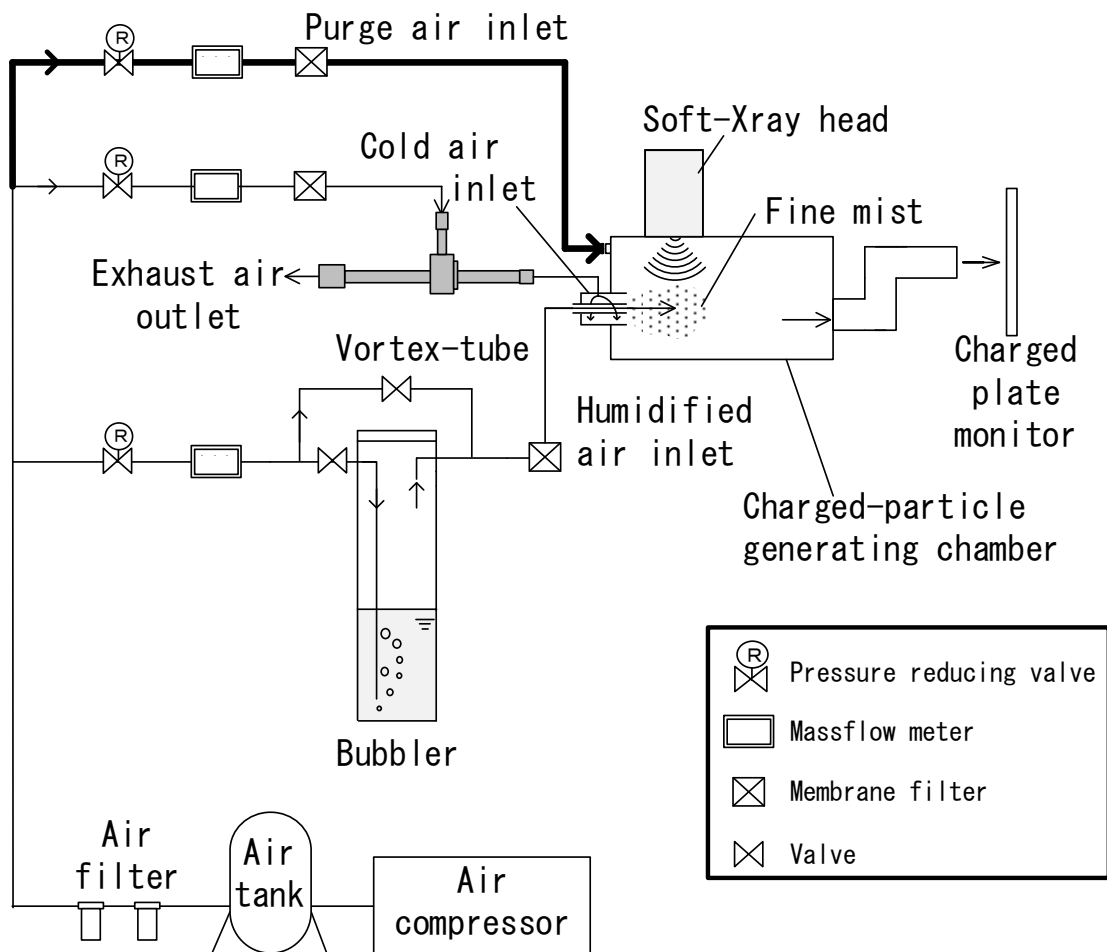


図 4.29 パージ空気吹出口を設けた実験装置の概略

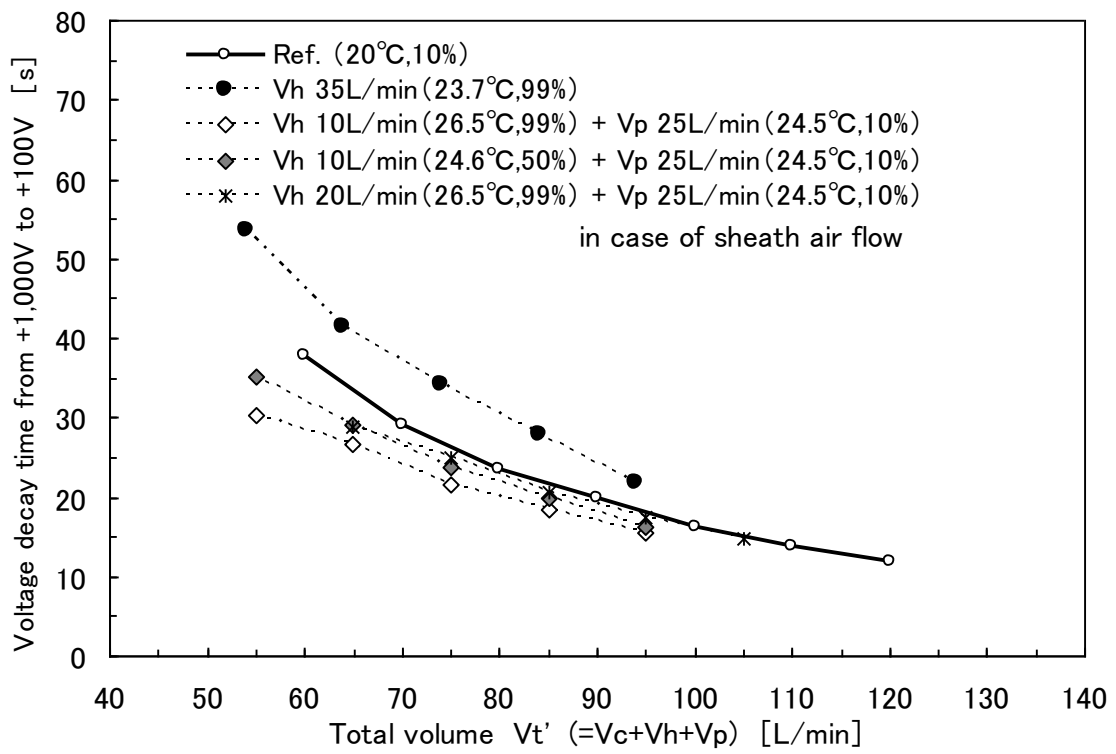


図 4.30 冷却空気量と加湿空気量、およびパージ空気量の  
合計供給空気量の除電時間への影響

### (2) - 3 冷却空気温度の影響

冷却空気の温度と加湿空気の凝縮について、図 4.31 に示す空気線図を用いて、導入した加湿空気が凝縮するために必要な冷却空気の温度条件を検討した。空気線図とは、乾球/湿球温度/露点温度、絶対/相対湿度、エンタルピーなどの条件を用いて、空気の状態や熱的变化を知るために用いられる。チャンバーには、冷却空気を 40L/min、加湿空気を 26.5°C、99%で、シーソノズルを用いて 10L/min 導入する条件とした。図中の①は加湿空気の温湿度条件 (26.5°C, 99%) を示す。ボルトエクステンションチューブで発生させる冷却空気源は、コンプレッサーからの圧縮空気であるので、図中②の圧縮空気が大気開放された位置での温湿度条件 (20°C, 10%) から、冷却空気中に含まれる絶対湿度 (含有水分量) は、元の圧縮空気と同じ 0.0014kg/kg' となる (図中③)。この冷却空気によって加湿空気が冷却される状態を、2種類の空気が混合するものとして、混合した後の空気の絶対湿度を求める。冷却空気と加湿空気の、絶対湿度と風量の比から、混合空気の絶対湿度は、0.0053kg/kg(DA)となる (図中④)。この混合空気中の水分が凝縮するためには、混合空気が露点温度以下 (相対湿度 100%以上) になっていることが必要なので、この条件から混合空気の温度が 4.7°Cと求められる (図中⑤)。求めた混合空気の温度と、冷却空気風量、加湿空気の温度、風量から冷却空気の温度を計算すると、約-1°Cとなる (図中⑥)。よって、26.5°C、99%の温湿度条件の加湿空気 10L/min が凝縮するために必要な、40L/min の冷却空気の温度は、約-1°C以下と求められる。

次に、冷却空気、加湿空気の条件を上記と同様とし、冷却空気の温度を変化させたときの除電時間を測定した。冷却空気の温度が低いほど冷却熱は大きくなるため、加湿空気の凝縮が促進され、荷電粒子の生成効率は向上すると予想されるためである。なお、ページ空気は 25L/min でチャンバーに導入している。図 4.32 に測定結果を示す。破線は、水蒸気凝縮を行う場合のトータル風量 (冷却空気 40L/min+加湿空気 10L/min+ページ空気 25L/min=75L/min) と同風量の時のイオンのみ (基準空気) の除電時間を示す。なお、上記の検討結果より、冷却空気温度が-1°C以下の範囲では、水蒸気の凝縮により、荷電粒子が生成している条件になっていると思われる。図より、冷却空気の温度を-10°C以下まで下げても明確な除電時間の短縮は見られず、むしろ性能が悪くなる結果となった。原因としては、冷却



空気の温度を加湿空気の凝縮に必要な温度以上に下げても、荷電粒子の生成効率には影響していないことと、加えて、パージ空気による軟 X 線照射窓の保護が不完全であることが考えられる。冷却空気の温度を下げても冷却能力を上げた場合は、チャンバー内も冷却されているため、パージが不完全な場合、軟 X 線照射窓に結露し易い状態となり、イオン化の能力が低下したため、除電性能が悪くなった可能性がある。

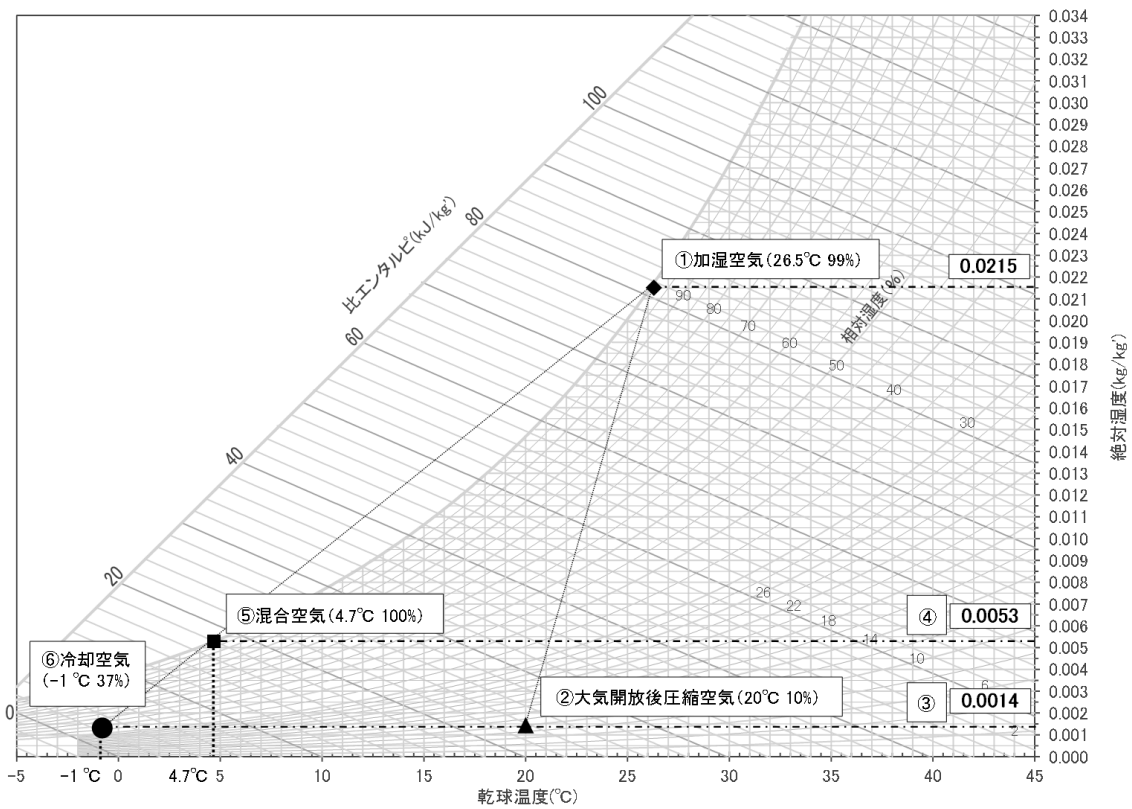


図 4.31 空気線図による冷却空気温度の検討

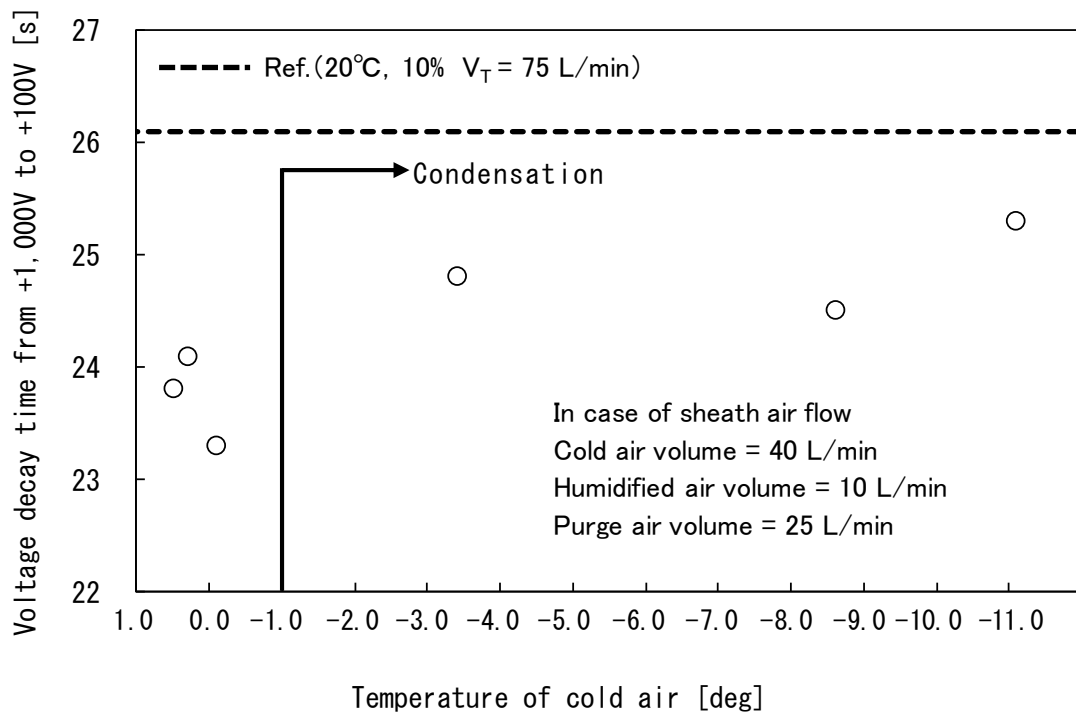


図 4.32 冷却空気温度の除電時間への影響

#### (2) - 4 パージ空気導入方法の影響

前項の検討結果から、軟 X 線照射窓のパージ空気による保護が不完全である可能性が示唆されたので、パージ空気の導入位置を図 4.33 のように、シースノズルの上部に内径 5mm のノズルを設けパージ空気を導入する方式 (Case 1) と、軟 X 線イオナイザーをパージ用ボックス内に入れ、軟 X 線照射開口 ( $\phi 20\text{mm}$ ) を通してパージ空気をチャンバー内に導入する方式 (Case 2) の 2 種類の方式にて除電性能への影響を比較した。加湿空気量 ( $V_h$ ) を 10 L/min、冷却空気量 ( $V_c$ ) を 25 L/min とし、パージ空気量を変化させた際の合計風量 ( $V_t$ ) が除電時間に与える影響を図 4.34 に示す。図より、Case 2 の方が Case 1 の場合に比べ、除電時間が短くなった。これは、パージ用ボックスを用いる方式の方が、側面から軟 X 線照射窓近傍に気流を吹き付ける方式に比べ、照射窓への加湿空気の接近を有効に防止することができるためであると考えられる。また、開口が大きいためパージ空気の吹出風速が小さく、チャンバー内気流への影響が小さいため除電性能向上には好ましいと考えられる。

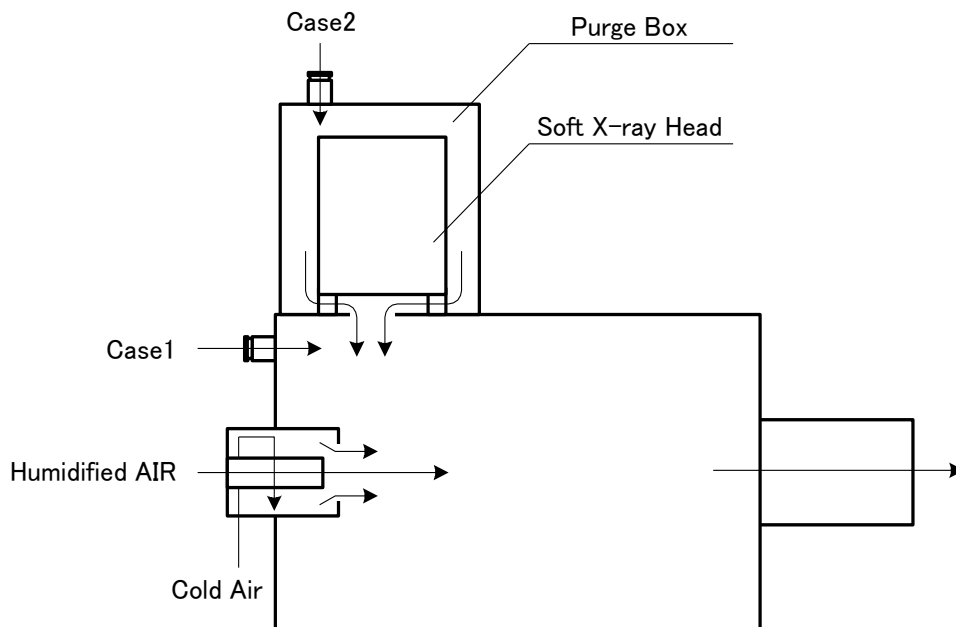


図 4.33 荷電粒子生成チャンバーへのパージ空気の導入方法

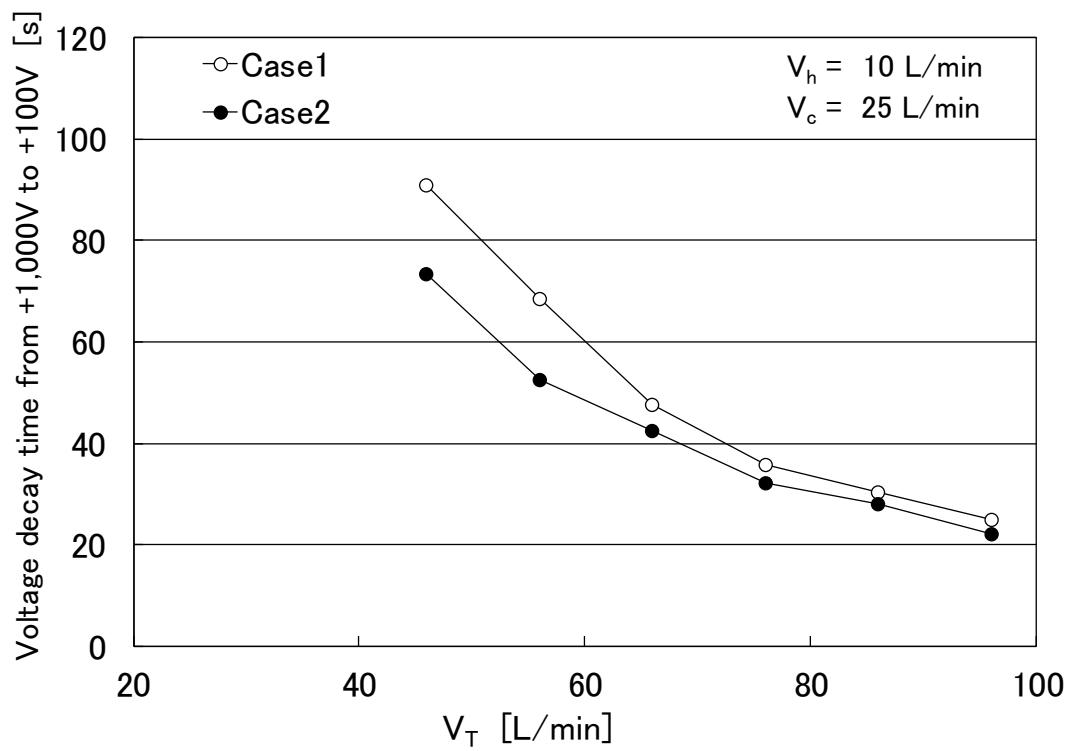


図 4.34 パージ空気導入方法の除電性能への影響

#### 4. 4 まとめ

第4章では、クリーンルーム用として軟X線式イオナイザーを適用するために、安全面とアプリケーションの面から検討を行った。

前半では、軟X線イオナイザーの使用者の被曝防止対策として、設置場所の防護対策を不要とした、軟X線遮蔽構造を有する安全なイオナイザーを提案し、遮蔽効果の確認と諸因子の除電性能に与える影響について調査した。以下に検討結果を示す。

- ①多孔板の孔径と板厚によって、軟X線を遮蔽しながらイオンを供給できる遮蔽構造を考案し、軟X線の漏れ線量率を遮蔽の基準とした $1\mu\text{Sv/hr}$ 以下に抑えながら、正負のイオンを十分に供給できることを確認した。
- ②イオナイザーに供給するエアータンクが多いほど、全体的な除電性能が向上することを確認した。
- ③イオナイザーからのイオン化エアータンクの分布は、軟X線遮蔽用の多孔板の孔の抵抗の影響を最も受け、イオン化チャンバーの形状やエアータンクの供給条件によらない。
- ④本イオナイザーの除電性能は、イオン化エアータンク中のイオン密度によって決まり、そのイオン密度はイオン化チャンバー内の軟X線強度とイオン化チャンバー内の気流性状の影響を受けることが示された。

また後半では、軟X線イオナイザーのアプリケーションとして、生産装置内などの狭小部の除電用に、チューブでイオンを搬送する方式のイオナイザーを提案した。イオンをチューブ搬送する際の、イオンの急速な消耗に対して、ボルテックスチューブの冷却による水蒸気の凝縮作用を利用してイオンを粗大化することで、イオンの移動度を抑え、消耗の低減を図る方式を考案した。また、そのイオナイザーについて、諸因子の除電性能に与える影響について調査した。以下に結果を示す。

- ①加湿空気の導入方法は、冷却空気を外側に、加湿空気を内側にした同心円状のシースノズル型の方が、直吹式に比べ除電性能が良い結果となり、僅かだがイオン粗大化の効果を確認した。
- ②軟X線イオナイザーの照射窓をパージして結露を防止することにより、除電性能が向上した。

- ③加湿空気の風量と温湿度条件により、水蒸気を凝縮するための、冷却空気の必要温度と必要風量が決まり、必要温度以上に冷却した場合には、軟 X 線照射窓の結露対策が重要となる。
- ④軟 X 線照射窓の結露対策には、パージ用ボックスを用いてパージ空気を導入する方式が、有効に結露を防止でき、チャンバー内気流への影響を抑えられ、除電性能の向上が可能であると思われる。

#### 第4章 参考および引用文献

- 1) 鈴木政典, 和泉貴晴, 鋒治幸, 石川昌義: 微弱 X 線イオナイザーの安全な使用方法, クリーンテクノロジー, 10 巻 6 号 (2000) p. 18
- 2) 池鯉鮒悟: 光照射方式イオナイザ「IRISYS シリーズ」, クリーンテクノロジー, 14 巻 7 号 (2004) p. 33
- 3) 稲葉仁: プロセスチャンバ内における除電技術, クリーンテクノロジー, 3 巻 11 号 (1993) p. 45
- 4) 浜松ホトニクス: フォトイオナイザ L9490 取扱説明書 Ver. 5
- 5) 稲葉仁: クリーンルームにおける制電エンジニアリング 生産現場での顧客への貢献, クリーンテクノロジー, 19 巻 4 号 (2009) p. 7
- 6) 稲葉仁, 大見忠弘, 吉田隆紀, 岡田孝夫: 極微弱軟 X 線照射除電技術, 静電気学会誌, 18 巻 1 号 (1994) p. 34
- 7) 佐藤朋且, 鈴木政典: 遮蔽構造を有する軟 X 線イオナイザーの開発, 第 15 回 EOS/ESD/EMC シンポジウム予稿集 (2005) p. 171
- 8) 鈴木政典, 金丸巧, 鈴木国夫, 杉田彰夫: イオン搬送式イオナイザーの開発, 第 16 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集 (1998) p. 119
- 9) 高橋幹二: 改著 基礎エアロゾル工学, 養賢堂 (1982) pp. 91-105
- 10) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, オーム社 (1981) p. 318
- 11) 大森豊明: 水-基礎・ヘルスケア・環境浄化・先端応用技術-, 技術教育出版有限会社 (2006) pp. 31-40
- 12) Y. N. Mikhailovsky: Atmospheric Corrosion, W. H. Ailor ed., Wiley Interscience (1982) p. 85
- 13) バウデン ティバ, 増田範宗訳: 固体の摩擦と潤滑, 丸善 (1961) p. 287
- 14) サンワエンタープライズ株式会社: 空圧シリーズカタログ, p4
- 15) X-Ray Attenuation Database of National Institute of Standards and Technology, USA

## 第 5 章 結論

### 5. 1 本研究のまとめ

電子デバイスの製造環境であるクリーンルームの静電気対策に関して、コンタミネーションコントロールに主眼を置き、従来のイオナイザーの課題を解決したクリーンルーム用イオナイザーを開発することを目的として、種々の検討を行った。クリーンルーム用イオナイザーとしては、コロナ放電式と軟 X 線式の代表的な 2 方式のイオナイザーを取り上げた。以下に、それぞれのイオナイザーをクリーンルームに適用するために検討を行った結果について、まとめを示す。

#### 5. 1. 1 クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）

コロナ放電式イオナイザーの放電電極への微粒子付着に起因する発塵に対して、放電電極を加熱することにより発生する熱泳動力を用いて微粒子付着を抑制し、製品にダメージを与え得る大きさの粒子として再飛散することを防止する方法を検討した。また、放電電極の摩耗に起因する発塵に対しては、電極表層の金属材料の特性を利用して、耐摩耗性能を向上する対策について検討した。その検討結果から、以下の内容が明らかとなり、本方式のコロナ放電式イオナイザーの実用化が可能であることを確認した。

- ①電極を加熱することによって微粒子付着の抑制が可能な熱泳動力を得るための温度勾配を、簡易モデルを設定して試算した結果、 $0.001\mu\text{m}$ 以上の粒子に対しては、 $100^{\circ}\text{C}$ 程度の温度差を周囲との間に形成すれば良いことが示された。
- ②実際にコロナ放電式イオナイザーの電極を  $90^{\circ}\text{C}$ 程度に加熱する実験にて、加熱しない場合に比べて異物付着量が減少する結果を得た。
- ③実用的な電極の加熱方法として、抵抗体のジュール加熱を用いた自己発熱型電極を考案し、抵抗体の抵抗値を調整することによって、任意の温度に加熱可能であることを確認した。



- ④抵抗体に SiC を組み込んだ自己発熱型電極（以降 SiC 電極：抵抗値  $10^7 \Omega$  程度）の発熱特性は、イオナイザーによって印加する交流電圧の交番周波数は数 kHz 以上で、電圧が高いほど、発熱温度が高い（発熱量が大きい）ことを確認した。
- ⑤イオナイザーの印加電圧（交流周波数：15kHz、電圧： $\pm 5 \sim 6$  kV）で抵抗値  $10^7 \Omega$  程度の SiC 電極を加熱する場合、イオナイザーから供給される電流の大部分は、電極が周囲と形成するコンデンサへの充放電に使われ、そのうち SiC 部分の充放電に使われる電流が、電極の発熱に寄与すると考えられる。また、コロナ放電でイオンとして放出される電流は、イオナイザーから供給される電流のごく一部で、十数  $\mu$  A 程度と考えられる。
- ⑥SiC 電極を用いた電極加熱式イオナイザーの除電性能、微粒子付着抑制効果の評価実験を行い、従来のイオナイザー用電極として用いられるタングステン電極とほぼ同等の除電性能を有しながら、発熱によって微粒子付着量を低減できることを確認した。
- ⑦電極の表層金属として、既存の耐摩耗性電極（ニッケルメッキ）の表層金属のニッケルよりも仕事関数が大きく、融点の高いイリジウム、もしくはロジウムを配することで、電極からの金属飛散量を既存のニッケルメッキ電極の 1/100 以下に抑えることができ、耐摩耗性が向上することを確認した。

## 5. 1. 2 クリーンルーム用無発塵イオナイザー（軟 X 線式）

軟 X 線イオナイザーを使用する際の安全面に関して、人体の防護対策を不要とした、軟 X 線遮蔽構造を持つイオナイザーを考案し、遮蔽効果、および除電性能について評価試験を行った。また、軟 X 線イオナイザーのアプリケーションとして、生産装置内などの狭小部の除電用に、軟 X 線で生成したイオンを水蒸気の凝縮で粗大化することで、電氣的移動度を大幅に下げ、イオンの消耗を抑えながらチューブ搬送する方式について検討を行い、除電性能に与える影響を調査した。その結果から、以下の内容が明らかとなり、本方式の軟 X 線イオナイザーの実用化が可能であることを確認した。

- ①軟 X 線遮蔽構造を持つイオナイザーについて、多孔板の孔径と板厚によって、軟 X 線を遮蔽しながらイオンを供給できる遮蔽構造を考案し、軟 X 線の漏れ線量率を遮蔽の基準とした  $1 \mu \text{Sv/hr}$  以下に抑えながら、正負のイオンを十分に供給できることを確認した。
- ②イオナイザーに供給するエアータンクが多いほど、全体的な除電性能が向上することを確認した。
- ③イオナイザーからのイオン化エアータンクの分布は、軟 X 線遮蔽用の多孔板の孔の抵抗の影響を最も受け、イオン化チャンバーの形状やエアータンクの供給条件によらずに決定する。
- ④本イオナイザーの除電性能は、イオン化エアータンク中のイオン密度によって決まり、そのイオン密度はイオン化チャンバー内の軟 X 線強度とイオン化チャンバー内の気流性状の影響を受けるので、その最適化により、除電性能向上が可能であることが示された。
- ⑤チューブ搬送型軟 X 線イオナイザーについて、加湿空気の導入方法を、冷却空気を外側に、加湿空気を内側にした同心円状のシースノズル型とすることで、僅かであるが除電性能が向上し、イオン粗大化と思われる効果を確認した。

- ⑥軟 X 線イオナイザーの照射窓をパージして結露を防止することにより、除電性能を向上できることを確認した。
- ⑦加湿空気の風量と温湿度条件により、水蒸気を凝縮するための、冷却空気の必要温度と必要風量が決まり、必要温度以上に冷却した場合には、軟 X 線照射窓の結露対策が重要となることが示された。
- ⑧軟 X 線照射窓の結露対策には、パージ用ボックスを用いてパージ空気を導入する方式が有効に結露を防止でき、チャンバー内気流への影響も抑えられることから、除電性能の向上が可能であることが示された。

## 5. 2 今後の課題

以下に、クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）、およびクリーンルーム用無発塵イオナイザー（軟X線式）について今後の課題を示す。

### 5. 2. 1 クリーンルーム用低発塵イオナイザー（コロナ放電式）

① コロナ放電式イオナイザーの放電電極への微粒子付着に起因する発塵に対して、放電電極を加熱することにより発生する熱泳動力を用いて微粒子付着を抑制する対策方法を検討し、微粒子の付着を抑制できることを確認した。しかしながら、微粒子付着を完全に防止する効果を得るには至っておらず、さらなる微粒子付着抑制効果の向上が必要である。本研究では、電極への微粒子付着現象が、クリーンルーム中のシロキサンガスが、コロナ放電の電極近傍で粒子化した後に、電極へ付着することにより生じるという仮定の下で検討を進めている。また、制御対象も無帯電粒子とし、付着力として働く静電気力としては、グレーディエント力のみを取り扱っている。そのため仮定以外の条件、例えばシロキサンガスが、ガス状のまま電極に接触することにより、何らかの反応系において粒子として成長する場合や、電極近傍の粒子が正負いずれかの電荷を持っていて、グレーディエント力よりもはるかに大きいクーロン力<sup>1)</sup>によって電極に付着する場合などは、本方式で対応するのは困難である。本方式にて電極への微粒子付着を完全に防止できていないのは、上記現象の可能性を示唆する結果とも言える。また、並木は、粒子生成の一つとして、ガス成分中にイオンが存在する場合、極性を有する不純物ガスがイオンに引き寄せられ、クラスタやナノ粒子を生成する、イオン核生成の重要性を指摘している<sup>2)</sup>。コロナ放電式イオナイザーの放電電極近傍は、まさにイオンと不純物ガスが混在した状態であると言え、イオン核生成が電極への微粒子付着の原因の一つとなっている可能性は非常に高いと思われる。これより、複数存在するであろう、電極における粒子生成メカニズムを解明し、詳細に把握することが重要になると考える。併せて、より高温の条件下では異物付着抑制効果の向上が期待できるため、確認評価を行うことが必要である。

②コロナ放電式イオナイザーの放電電極の摩耗に起因する発塵に対しては、電極表層に仕事関数が大きく、融点の高いイリジウムまたはロジウムをメッキすることで、耐摩耗性能が向上することを確認した。しかしながら、今回検討したイリジウム、ロジウムについては、金属としてのコストが高く、実用化にあたっては大きなハードルとなる。また、電子デバイス産業における微細化・高集積度化の発展を鑑みると、金属汚染に対する管理が今後ますます厳しくなることが予想される。コスト面も考慮しつつ、さらに耐摩耗性を向上できる電極材質の検討が必要であると考える。

## 5. 2. 2 クリーンルーム用無発塵イオナイザー（軟X線式）

①軟X線イオナイザー使用時の、人体の防護対策を不要とした、軟X線遮蔽構造を持つイオナイザーを考案し、軟X線を遮蔽しながら、除電対象にイオンのみを供給できることを確認した。しかしながら本方式は、直接照射式の軟X線イオナイザーに比べ除電性能が劣ることが、最大の問題点である。軟X線遮蔽チャンバー内でイオンを生成した後に、チャンバー外へ気流によって搬送するため、イオンの消耗が大きいことが原因である。このイオナイザーは、現時点で実用化されてはいるが、除電性能を向上するために、今回調査した種々のパラメーターを最適化することが必要である。

②狭小部の除電用の、チューブ搬送型軟X線イオナイザーについて、水蒸気の凝縮を利用してイオンを粗大化することで、チューブ搬送中のイオンの消耗を抑える方式を考案した。現状、僅かではあるが、イオン粗大化の効果を確かめているが、上記①のイオナイザー同様、直接照射式の軟X線イオナイザーに比べると、除電性能は劣っている。今後、除電性能の向上のためには、水蒸気を正負イオンに凝縮させるために必要な水分量、冷却空気の温度などの空気条件を詳細に設定するとともに、生成粒子の粒径分布の測定を行い、イオンの粗大化について評価することが必要であると考える。併せて、今回調査したパラメーターについても最適化することが必要である。

## 第5章 参考および引用文献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社（1981）p. 254
- 2) 並木則和：クリーンルーム環境におけるガス-粒子変換—イオナイザ電極における粒子生成に着目して—，クリーンテクノロジー，4巻7号（1994）p. 67

## 謝辞

2011年10月から大学院に入学して以来、クリーンルーム環境における静電気対策に関する研究に取り組み、その成果を学位論文としてまとめるまで、終始懇切なる御指導を賜りました豊橋技術科学大学環境・生命工学系教授 水野彰先生に深く感謝の意を表します。また、同准教授・高島和則先生には、研究遂行にあたり様々な御指導ならびに御助言を賜りました。ここに感謝致します。

また、本論文の審査をして頂きました豊橋技術科学大学環境・生命工学系教授 田中三郎先生には、審査を通して有益な御助言を賜りました。深く感謝の意を表します。

さらに、豊橋技術科学大学環境・生命工学系 静電気応用工学研究室修士の中村拓麻様をはじめ研究室の学生の皆様にも、様々な御協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

社会人大学院生として本研究を実施していくにあたり、社会人入学を快諾頂くとともに、終始深い御理解を頂きました(株)テクノ菱和 代表取締役社長 阿部捷司氏、ならびに社会人入学に際し御尽力頂きました、同社技術開発本部長 松橋秀明氏、同社前技術開発研究所長 海老根猛氏に深甚なる感謝の意を表します。

本研究の推進にあたり御協力を頂きました、(株)テクノ菱和各事業所の関係各位に感謝致します。なかでも、同社現技術開発研究所長 田村一氏を中心とした研究所員の方々には、様々な面において多大な御協力と御助言を頂きました。深く感謝致します。

最後に、長きにわたり私を支え、協力してくれた家族と、氏名は挙げられませんでした。他にも数多くの方々の御助言と御協力があったことをここに記し、感謝の意を表します。

2014年9月

佐藤 朋且