遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザーの遮蔽性能の評価

鈴 木 政 典*, 佐 藤 朋 且*, 松 橋 秀 明*, 水 野 彰** (2006年9月15日受付, 2007年2月19日受理)

Shielding Performance of Soft X-ray Ionizer with Shielding Structure

Masanori SUZUKI*, Tomokatsu SATO*, Hideaki MATSUHASHI* and Akira MIZUNO** (Received September, 15 2006; Accepted February 19, 2007)

Recently, in semiconductor and LCD manufacturing processes, ionizers have been used that employ low energy X-rays of 3 to 9.5 keV (soft X-rays), as the ionization source. However, when this ionizer is installed on a manufacturing equipment, the equipment must be covered with shielding panel to shield the soft X-rays. In addition, this equipment requires safety measures to stop ionizer automatically, when a worker entered a shielding area by any chance. For those reasons, this type of ionizers are inconvenient. Therefore we have conducted the development of soft X-ray ionizer with shielding structure. In the previous paper, we reported the results of investigation about the structural condition of shielding structure that consists of aluminum honeycomb and perforated plates. In this paper, we report about the structural condition of shielding structure that consists of small pipes. We confirmed that the leakage dose rate of the soft X-rays could be decreased to less than 1 µSv/hr while allowing the passage of enough ion pairs to eliminate the static electricity.

1. はじめに

近年,半導体や液晶製造工程において,無発塵で除電性 能に優れ,かつ遮蔽が容易なことから,エネルギーが 3~ 9.5keV (peak 約 6keV)の低エネルギーX線(軟X線)を イオン化源とするイオナイザーが利用されるようになっ てきている^{1.2)}.その一例を図1に示す.しかし,このイオ ナイザーを生産装置等に設置した場合,軟X線を遮蔽する ため,生産装置を塩ビ板等で囲み,万一作業者が囲み内に 入った場合でも,X線照射が自動停止する安全対策が必要 で,取り扱いが比較的不便であった¹⁾.そこで,イオナイ ザー自体からの発塵や軟X線の漏れが無く,設置後塩ビ板 等による遮蔽が不要なイオナイザー(図 2)を考案した¹⁾.

キーワード:低エネルギーX線,軟X線,遮蔽,イオナイザ ー,クリーンルーム

- * (株) テクノ菱和 技術開発研究所 (156-0052 東京都世田 谷区経堂 5-33-6) Technical R&D Center, Techno Ryowa Ltd., 33-6, Kyodo 5-chome, Setagaya-ku, Tokyo, 156-0052, Japan
- ** 豊橋技術科学大学 エコロジー工学系 (441-8580 愛知県豊 橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1) Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580, Japan

このイオナイザーにおいては、安全上、正負イオンは通過 できるが、軟X線は遮蔽される構造体が必要である.しかし、 遮蔽構造体にイオンが通るための開孔を設けた状態で、軟X 線を遮蔽することは困難であった.

既報^{3,4})においては、図 2-(a)に示すように、一定の隙間をあ けて、孔が重ならないように重ねた種々のパンチング板 2 枚 とハニカムからなる、簡単な構造の遮蔽板のサンプルを用い て、軟X線を遮蔽するための遮蔽構造の条件を検討した.本 報(図 2-(b))では、新たに小孔径の金属パイプのサンプルを 用いて軟X線を遮蔽することを試み、その遮蔽構造の条件に ついて検討を行った.そして、その遮蔽構造を最適化するこ とで、軟X線の漏れ線量率を1 µ Sv/hr 以下にでき、かつ正負 イオンが充分に通過できることを確認し、本方式のイオナイ ザーの実用機を開発した.

2. 遮蔽構造を持つ軟×線イオナイザーの概要及び主 な特徴

図 2-(b)に、今回検討した遮蔽構造を持つイオナイザーの概 要を示す. このイオナイザーは、角柱状のイオン化チャンバ ー内を軟X線でイオン化し、コンプレッサー等からのエアで 正負イオンを静電気発生箇所に吹付けて除電するものである. イオン化チャンバーの吹出部は小孔径のパイプを打込んだ構 造になっており、このパイプの孔径および長さによって、イ オンは通すが軟X線は遮蔽する構造になっている.このイオ ナイザーの主な特徴を以下に示す.この特徴は、タイプAの イオナイザーにおいても同様である.

- イオナイザー自体が、軟X線の遮蔽構造になっているため、設置の際、このイオナイザーの周囲を遮蔽構造とする必要が無く、設置が容易で安全である.
- (2) コロナ放電を用いたイオナイザーのように、放電電 極を使用せず、軟X線によりイオン化するため、① 電極からの発塵、②オゾンの発生等の問題が無い.
- (3) 設置時の出力調整が不要,また、一定期間に一度、 軟X線ヘッドを交換するだけで、他のメンテナンス が不要である。
- (4) コロナ放電式と異なり火花放電の恐れが全くない ため、防爆型仕様にすることも原理的に容易である.

3. 実験装置および方法

実験に用いた遮蔽用パイプ(アルミニウム製,肉厚 1mm) のサンプルは,孔径が 4 種類(d=2mm φ, 3mm φ, 4mm φ, 5mm φ),長さがそれぞれの孔径について 6 種類(L=10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 50mm)の合計 24 種類である. これらの遮蔽用パイプによる軟X線に対する遮蔽性能を評価 するための実験装置を図 3 に示す.遮蔽性能は,遮蔽用パイ プ1本当たりの軟X線の透過率を求め,その大小を比較する ことにより評価した.透過率が小さいほど,遮蔽性能は優れ ていることを示す.

遮蔽用パイプの遮蔽性能すなわち透過率を求める実験は, 次のように行った. まず, 軟X線管 (表 1²⁾) を収めた SUS 製の角筒内で軟X線を照射し、線源(Be 窓)からの距離 D の位置に、軟X線の照射方向に対して垂直に、遮蔽用パイプ を一本打込み、そのパイプからの漏れ線量率Iを電離箱式サ ーベーメータ(アロカ製 ICS-321R1)で測定した.次に距離 Dの位置を種々変えて同様な測定を行った.そして、この一 連の測定を24種類のパイプにおいて行った.尚,電離箱式サ ーベーメータは、打込んだパイプの出口から実行中心線まで の距離が 65mm になるように設置した. 透過率 I/I₀は、サー ベーメータで測定したパイプからの漏れ線量率 I (パイプ出 口から65mmの位置,すなわち図3内の*2の位置での線量率) と、後述する近似式(1)から計算した入射線量率 I。 (打込ん だパイプ入口での位置, すなわち図3内の*1の位置での線量 率)との比から求めた.

透過率を求める際の線量率は、X線に敏感な組織(皮膚)

の等価線量率である 70 μ m 線量当量率(人体表面から深さ 7 0 μ m における被曝線量率)で測定を行った.これは、9.5ke V以下の低エネルギーX線(軟X線)は、微弱なために皮膚 表面でほとんど吸収されてしまうので、電離放射線障害防止



図1 軟X線イオナイザー(浜松ホトニクス製 L9490) Fig.1 Soft X-ray ionizer (Hamamatsu Photonics L9490).



(a) Type A



(b) Type B

図2 遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザーの概要

Fig.2 Outline of soft X-ray ionizer with shielding structure.

規則で規定されている実効線量率(1cm 線量当量率:人体 表面から深さ1cm における被曝線量率)で測定すると,軟 X線の線量率(X線強度)を過小評価することになるから である⁵⁾.

また,用いた ICS-321R1 は、日本品質保証機構 JQA にて 9.5keV 以下の低エネルギーX線(70 μ m線量当量率で1 μ Sv/hr以上)が、測定できるように校正されている.また、窓 材として、厚さ 0.0362mm のポリエチレンテレフタレートフ ィルム (Mylar,質量減弱係数:54.7cm²/g at 4keV⁶) を使用し ているので、4keV の低エネルギーX線でも後出可能であることを 示している.

4. 実験結果および考察

4.1 空気中での軟×線の減弱特性

透過率 I/I₀を求める際の入射線量率 I₀は,図3の打込んだ パイプの入口端面の位置(図3内の*1の位置)での直達線量 率とした.そこで,線源(Be窓)から任意の距離における軟 X線の直達線量率を求めるために,図4に示す様に空気中で



図3 遮蔽性能を評価するための実験装置 Fig. 3 Experimental setup for estimating the shielding performance.

表1 軟X線管の仕様

Table 1 Specifications of soft X-ray	tube ²
--------------------------------------	-------------------

items	Specifications
Tube voltage	DC 9.5kV
Tube current	150 μ A
Window material	Beryllium, 0.3mm thickness
Irradiation angle	approx. 130 degree (cone angle)
X-ray wavelength	1.3~4.1 Angstroms, peak 2 Angstroms
X-ray energy	3∼9.5keV, peak 6keV

の軟X線の減弱特性を調べた.軟X線ヘッドとサーベーメータが 同じ光軸上にくるように向い合せて設置し,線源から光軸に沿っ てサーベーメータを遠ざけて線量率(Dose rate)を測定した.た だし,サーベーメータ ICS-321R1 は,Max10mSv/hr までしか測 定できないため,線源に近い10mSv/hr以上の測定には,米国ビ クトリーン製 450B-SI(Min.5 μ Sv/hr,Max.500mSv/hr)を使用した. 450B-SIは,ICS-321R1と同様に,9.5keV以下の低エネルギーX 線(70 μ m線量当量率で 5 μ Sv/hr以上)が,測定できるように校 正されている.また,4keV の低エネルギーX線でも検出可能で ある.

軟X線の線量率 (Dose rate) は,線源に近い約 740mm 以 内では近似式(1)に従い,線源から遠い約 1400mm 以上では近 似式(2)に従って減衰した.

I_x = 4.0×10⁶e^{-0.0055}x (1) (距離約 740mm以下)

 $I_x = 2.9 \times 10^5 e^{-0.0025 x}$ (2) (距離約 1400mm以上)

すなわち,低エネルギーX線(軟X線)の線量率は,硬X 線のように距離の二乗に比例して減衰しない.これは,低エ ネルギーX線は空気に吸収され易いことが原因と考えられる.

本実験装置において、パイプを打込む位置を線源からの距離 D=20mm~200mm としたので、上記の結果に従い、透過率の基準となる入射線量率 I_0 (= I_x) は近似式(1)により求めた.

4.2 入射線量率と透過率の関係

図5にパイプ1本当たりの,入射線量率(線源からの距離) と透過率の関係を示す.パラメータは,パイプの径と長さで, パイプ径が4種類(図5-(a)~(d)),長さがそれぞれの径につ き6種類である.



図4 空気中での軟X線の減弱特性

Fig.4 Attenuation of soft X-ray in the air.

入射線量率が小さい程(線源からの距離が長い程)透過率 は小さく,入射線量率の増加とともに(線源に近くなる程) 透過率は大きくなっている.また,パイプの径は小さい程, パイプの長さは長い程,透過率は小さく,軟X線を遮蔽し易 いことが分かる.これは,パイプへの入射線量率が大きい場 合(線源に近い場合),用いるパイプは径が小さく,長さが長 いものを選定することで透過率を小さくすることができ,パ イプへの入射線量率が小さい場合(線源から遠い場合),用い るパイプは径が大きく,長さが短いものを選定できることを 示している.

実際にパイプを選定する時は、前述の減弱特性の近似式(1) からパイプを打込む位置の入射線量率を算出し、図5からそ の透過率を求め、パイプ1本当たりからの漏れ線量率を計算 しながらパイプの径と長さを、安全を見込んで選定する.し かし、パイプにおける正負イオンの再結合による消耗を考慮 すると、漏れ線量率を抑えつつ、なるべく径が大きく、長さ の短いパイプを選定することが必要となる.

4.3 イオナイザー実機による遮蔽性能の確認と除電性能の測定

4.3.1 遮蔽性能の確認

図6にイオナイザー実機の外観を、そのイオン化チャンバ ー部の概要を図7に示す. $2mm\phi \times 50mmL$ のパイプ9本、 $3mm\phi \times 50mmL$ のパイプ9本、 $4mm\phi \times 30mmL$ のパイプ8本、 $5mm\phi \times 30mmL$ のパイプ16本を、正負イオンの消耗も 考慮して選定し、遮蔽を行った.

イオナイザーからの漏れ線量率は、次のように計算する. まず、各パイプの位置毎に入射線量率を近似式(1)から求める. 続いて、図5に示す透過率のデータから、透過率を求める. そして同一径のパイプを設けたエリア毎の漏れ線量率を求める. る.

例えば 2mm ϕ × 50mmL のパイプを設けたエリア内で最も 線源に近い位置 D=60mm のパイプ (図 7 内で,網掛けされて いるパイプ)の入射線量率は $I_0=2.88 \times 10^6 \mu$ Sv/hr となる.次 に,図 5 の径 2mm ϕ ,長さ 50mm の曲線から透過率 I/ $I_0=0.05 \times 10^6$ を得る.よって,D=60mm の位置での 2mm ϕ × 50mmL のパイプ 1 本からの漏れ線量率は,I= $2.88 \times 10^6 \times 0.05 \times 10^6=0.14 \mu$ Sv/hr と計算される.

ここでエリア毎の広さが十分狭いので、エリア内で最も線 源に近いパイプ(図7内で、網掛けされているパイプ)1本 からの漏れ線量率をエリア内に打込んだパイプ本数倍するこ とで、このエリアの漏れ線量率の概算値を求める.上記のエ リアからの漏れ線量率の概算値は0.14 µ Sv/hr×9本=1.29



図5 入射線量率と透過率の関係

Fig.5 Relationship between the dose rate at pipe inlet and the penetration (I/I_0) .

 μ Sv/hr となり、このようにして概算すると、3mm ϕ × 50mm L のエリアは 0.90 μ Sv/hr、4mm ϕ × 30mm L のエリアは 0.32 μ Sv/hr、5mm ϕ × 30mmL のエリアは 0.96 μ Sv/hr と求められ る. 実際に、サーベーメータで実機からの漏れ線量率を測定 すると、どの径のエリアでも 1.0 μ Sv/hr 以下であった.

なお、漏れ線量率の許容値を 1μ Sv/hr とした理由は、X線 応用装置筐体外側の許容値が、慣例的に 1μ Sv/hr 以下である ことに基づいている.

4.3.2 除電性能の測定

図7の遮蔽構造を持つイオナイザー実機の除電性能を測定 した.除電性能は、帯電プレートモニタ(Trek 製 Model 158) の金属プレート(152×152 mm, 20pF ± 2 pF)を 1kV(または -1kV)に帯電させ、その初期電位が遮蔽構造出口からの正負 イオンにより十分の一の 0.1kV(または-0.1kV)まで減衰する 時間(Voltage decay time、すなわち除電時間)により評価した. 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.

図8は,除電性能(除電時間)と遮蔽構造(パイプ)出口 面から帯電プレートモニタまでの距離との関係を示す実測結 Be-window 果である.また,噴出エア風量の除電性能への影響も調べた. 帯電プレートモニタは負極性に帯電させ,正イオンによる除 電性能を評価した.

距離の増加に伴い,除電時間が長くなり除電性能が低下している.また,遮蔽構造出口面からの風量が多くなるにつれ除電性能が向上することが分かる.これらの結果は,正イオンによる除電性能を示しているが,負イオンによる場合も同様な傾向を示した.

すなわち, 選定した遮蔽構造により, 軟X線の漏れ線量率 を 1.0 μ Sv/hr 以下にでき, かつ充分な除電性能(数秒での除 電が可能であること.)を得ることができることが分かる.

5. まとめ

小孔径の金属パイプを用いて,軟X線を遮蔽するための遮 蔽構造の条件を検討し,下記の知見を得た.

- 軟X線の線量率は、空気中では距離の二乗に比例して減 衰せず、線源に近い位置では急速に減衰し、線源から離 れた位置では減衰が緩やかである。
- ② 任意のパイプに対して、入射線量率が小さい程(線源からの距離が長い程)透過率は小さく、入射線量率が大きい程(線源に近い程)透過率は大きくなる。



図6 遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザーの外観

Fig.6 Soft X-ray ionizer with shielding structure.





Fig.7 Outline of shielding structure at the ion generating chamber.



図 8 遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザーの除電性能 Fig.8 Static eliminating performance of the soft X-ray ionizer with shielding structure.

- パイプは径が小さく、長さが長い程遮蔽性能が向上する.
- ④ パイプ入口での入射線量率と透過率の関係から、パイプ1本あたりの漏れ線量率を求めることができる.
- ⑤ 小孔径のパイプを用いた遮蔽構造を持つイオナイザー 実機にて,軟X線の漏れ線量率を1µSv/hr以下にでき, かつ正負イオンが十分に通過することを確認した.

参考文献

- 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, Vol.10, No.6(2000)18
- 2) 浜松ホトニクス:フォトイオナイザL9490 取扱説明書

- M. Suzuki, T. Sato, H. Matsuhashi, A. Mizuno : X-ray shielding of an ionizer using low-energy X-rays below 9.5keV for ultra-clean assembly line of electronic devices, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.44, No.7A(2005)4878
- 4) 佐藤朋且,鈴木政典,松橋秀明:遮蔽構造を持つ軟エック ス線イオナイザーの開発(その2),第23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, (2005)222
- 5) 稲葉仁, 岩波茂:10kV以下の軟X線防護のための線量測定, 第30回日本保険物理学会予稿集,日本保険物理学会(1995) 3
- X-ray Attenuation Databases, National Institute of Standards and Technology in USA