

論 文

簡易型低エネルギーX線検出器の開発

鈴木政典*, 今井精一**, 松橋秀明**, 水野彰*

(2004年8月23日受付, 2004年12月15日受理)

Development of the Detector for Low Energy Scattered X-rays
Using Charged Spheres

Masanori SUZUKI*, Seiiti IMAI**, Hideaki MATSUHASHI**, Akira MIZUNO*

(Received August 23, 2004; Accepted December 15, 2004)

Recently, in semiconductor and LCD manufacturing processes, ionizers have been used that employ low energy X-rays (soft X-rays) of 3 to 9.5 keV, as the ionization source. However, these low energy X-rays cannot be detected using film badges or the like as their energies are so low, and there is no appropriate personal dose meter. In these conditions, an inexpensive and easy-to-use personal dose detector is required for workers for daily use to avoid unexpected exposure.

Therefore, we have designed a wearable low energy X-ray detector that uses four electrically charged conductive spheres floated by static electricity repulsion force. Ions generated by ionization function of the low energy X-rays projected in the detector neutralize electrically charged conductive spheres. From the number of spheres dropped, the detector detects the dose of the low energy X-rays.

In this report, we have examined a simple way to detect low energy scattered X-ray dose from the number of dropped conductive spheres.

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⁾. それらのイオナイザーの一例の外観と仕様をそれぞれ図1と表1²⁾に示す. しかし, このX線は, エネルギーが低いため, 従来のフィルムバッジ等では検出できず, 適当な個人被曝線量計が無いのが実情である. それ故, 個人被曝線量計として, 安価で簡単に被曝量を測定できる検出器が求められている.

そこで, 静電気的な斥力によって4個の導電性ボールを浮

上させ, 検出器内に入射した低エネルギーX線の電離作用で発生したイオンによりそれらを中和して, 落下した個数から低エネルギーX線の線量を簡易的に検出する方式の装着型低エネルギーX線検出器を考案した.

本論文では, この検出器において, 落下した導電性ボールの個数から, 低エネルギー散乱X線の線量を簡易的に検出する方法を検討し, それが可能であることを確認したので, その結果について報告する. ただし, 本報では, 湿度の影響について特に調査をしていない. それは, この検出器を実用化する際は, その窓材に厚めのX線透過フィルムを採用し, かつ検出器の容器を接着剤で密封するため透湿による電荷のリークの危険はほとんど無いと予想されるからである.

2. 検出原理と用途

この検出器は, 低エネルギーX線が透過するポリイミド樹脂フィルム(デュポン社製 Kapton, 厚み50μm)を貼った窓を持つチャンバー内に, 金属球電極と4個の導電性ボールを封入し, 金属球電極と導電性ボールを同極に帯電させ, 静電気的な斥力によって4個の導電性ボールを浮上させる方式の装着型低エネルギーX線検出器である(図2). 金属球電極と導電性ボールの帯電は, 検出器下部から金属球電極を直流

キーワード: 低エネルギーX線, 軟X線, 簡易型検出器, イオナイザー, クリーンルーム

* 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

** (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

電源で帶電させることにより行う。金属球電極（Steel, 直径6mm ϕ ）は、球形であることから帶電の際の放電を防止するために電極として用いられている。その上、金属球電極は、電気的に高絶縁され、できるだけ電荷のリークが防止されている。導電性ボールは、発泡ポリスチレンの表面を厚み約10 μm の銅メッキで導電化した直径6mm ϕ の軽量ボール（約3.8mg/1個）である。また、これらの導電性ボールは、垂直に浮かせるために6本のテフロン柱（直径1mm ϕ ）で支持されている。

この検出器は、X線透過フィルムを貼った窓より入射した低エネルギーX線の電離作用により、入射したX線の線量に応じて正負の空気イオンが発生し、それにより帶電した金属球と4個の導電性ボールが中和され、その結果落下した導電性ボールの個数から、低エネルギーX線の線量を簡易的に検出することを意図したものである。

この検出器は、9.5keV以下の低エネルギーX線による数mSv/日程度（皮膚における被曝線量：70 μm 線量当量）の被曝の有無と概略値を作業者に知らせ、警告するために使用する。電離放射線障害防止規則では、国際放射線防護委員会（ICRP）1990年勧告を受けて、皮膚についての被曝線量限度を500mSv/年（70 μm 線量当量）としており、これを1日当たりに



図1 低エネルギーX線イオナイザー（浜松ホトニクス製L9490）

Fig.1 Low energy X-ray ionizer (Hamamatsu Photonics L9490).

表1 低エネルギーX線イオナイザーの仕様

Table 1 Specifications of low energy X-ray ionizer.²⁾

Items	Specifications
Tube voltage	DC 9.5kV
Tube current	150 μA
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

換算すると数mSvとなるところから、検出範囲を決めている。尚、9.5keV以下の低エネルギーX線は、ほとんどが皮膚で吸収され、人体深部へ至らないため、被曝対象を皮膚としている²³⁾。

3. 実験装置及び方法

実験装置図を図3に示す。ガラス製の遮蔽箱（600×280×340mmH）内に、装着型低エネルギーX線検出器（図2）を設置する台を置き、その上にその検出器を置いたとき検出器の入射窓の中心と同じ高さに線源の窓の中心が来るよう、低エネルギーX線（軟X線）発生装置（浜松ホトニクス製 C4870）を設置した（図3-(b)）。このX線源の仕様（表2⁴⁾）は、イオナイザーとして利用されているX線源（表1）とほぼ同じである。また、このX線源は、出力を調整できるが、それでもこの遮蔽箱内で使用するには、線量率が大き過ぎたため、線源の窓に、ポリイミド樹脂シート（厚み0.525mm）を貼って線量率を低下させて使用した。ただし、これによるX線源のX線スペクトルへの影響がほとんどないことを確認している。

各種条件での積算線量（70 μm 線量当量）を求める実験は、低湿度室内（相対湿度：約1%，温度：24°C）に上述の実験装置を設置して、次の手順で行った。

- ① まず、検出器を設置台の上に置いたとき検出器内の導電性ボール（検出器を真上から見た時の検出器中心）

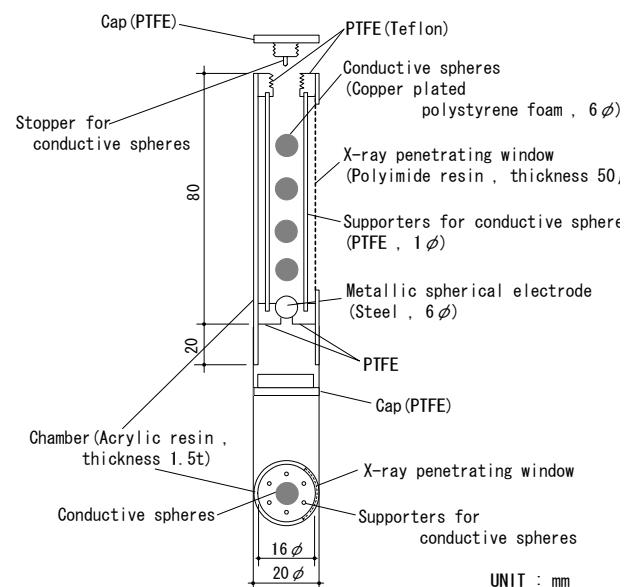


図2 実験用低エネルギーX線検出器

Fig.2 Low energy X-ray detector for experiment.

- の来る位置（線源の窓から 250mm の位置、図 3-(a)）に、電離箱式サーベーメータ（米国 Victoreen 社製、450B-SI）の電離箱の中心（実効中心マーク：電離箱内のセンサーのある位置を示す印）が来るよう、線源に測定窓に向けてそのサーベーメータを設置した。そして、一定線量率を出射するように、そのサーベーメータにより線源の出力調整を行った。出力調整は、ターゲット電圧を 9.5kV に固定し、ターゲット電流を調節する方法で行った。ただし、散乱 X 線の測定の場合は、X 線が直接サーベーメータや検出器に当たらない位置（図 3-(a) の B の位置）に移動して調整を行った。用いた 450B-SI は、日本品質保証機構 JQA にて 9.5eV 以下の低エネルギー X 線（ $70 \mu\text{m}$ 線量当量率で $5 \mu\text{Sv/h}$ 以上）が、測定できるように校正されている。
- ② その後、必要個数の導電性ボールを検出器内に封入して、静電容量を一定にするため所定の位置で、一定電圧を検出器の金属球電極に印加して、導電性ボールを浮上させてから遮蔽箱内の所定の位置の台の上に検出器を設置した。
 - ③ そして、一定線量率の X 線を出射して、導電性ボールが落下するまでの時間を測定し、導電性ボールが落下するまでの積算線量を求めた。

尚、実験は低湿度環境で行ったが、これは、金属球電極と導電性ボールに蓄積する電荷量がわずかと予想されたので、湿度による電荷のリークに基づく外乱を排除するためである。

4. 実験結果及び考察

4.1 低エネルギー X 線透過フィルムの透過率の特性

検出器の窓材として使用している低エネルギー X 線透過フィルム（ポリイミド樹脂）の特性として、フィルム厚み及び入射 X 線線量率（X 線強度）の透過率への影響を図 4 及び図 5 にそれぞれ示す。図 4, 5 では、測定窓を線源に向けてサーベーメータを図 3-(a) の A の位置（サーベーメータの電離箱の実効中心マークが線源の窓から 250mm の位置）に設置し、サーベーメータの測定窓の直前にポリイミド樹脂フィルムを設置して、フィルムがない場合とある場合の線量率を測定して、その比から透過率を求めた。

フィルムが厚いほど透過率は低下するが、厚みの増加量（ $2 \mu\text{m} \rightarrow 175 \mu\text{m}$ ）に比べ透過率の低下（96% → 72%）は少ない（図 4）。これは、透湿防止のためにフィルム厚みを厚くすることが可能であることを示している。また、入射 X 線線量率による透過率への影響はほとんど観られない（図 5）。何れも、このフィルムを検出器の窓材として利用する上で有効な特性である。

4.2 導電性ボールが落下するまでの積算線量と導電性ボール上の電荷量の関係

図 6 に、導電性ボールが落下するまでの積算線量と金属球電極に印加する電圧との関係を示す。ただし、実験は、導電性ボール 1 個を検出器内に封入し、金属球電極に一定電圧を印加することにより導電性ボールを浮上させ、その後、検出器中心の位置（導電性ボールのある位置）で 64mSv/h になるように低エネルギー X 線を導電性ボールが落下するまで照射して行った。

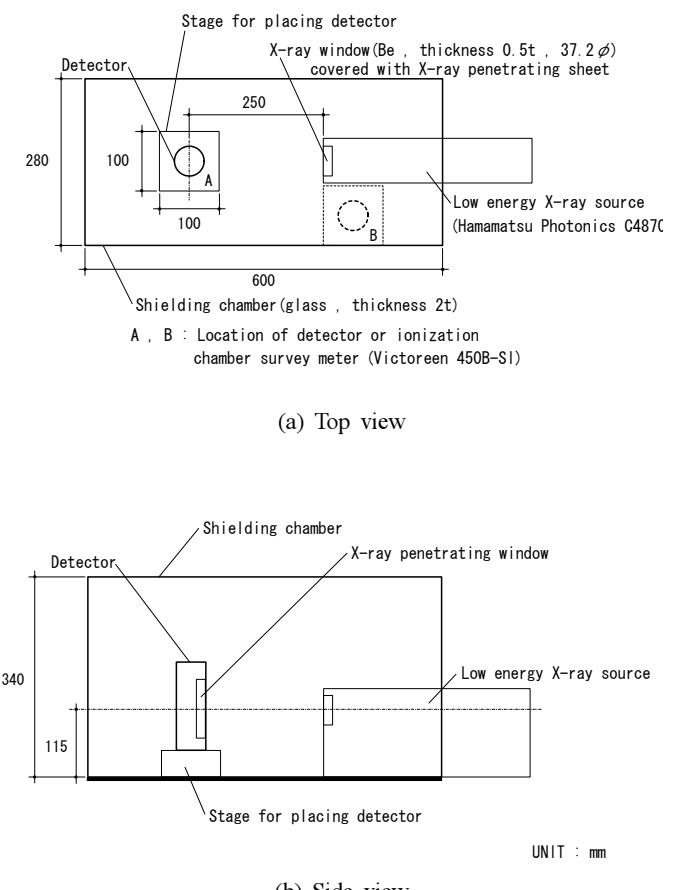


図 3 実験装置

Fig.3 Experimental setup.

表 2 低エネルギー X 線源の仕様

Table 2 Specifications of low energy X-ray source.⁴⁾

Items	Specifications
Target voltage	~ Max. 9.5kV DC
Target current	~ Max. $200 \mu\text{A}$
Window material	Beryllium, 0.5mm thickness
Irradiation angle	approx. 120 degree (cone angle)
X-ray energy	2~9.5keV, peak 5keV

図6より、落下するまでの積算線量と金属球電極への印加電圧（すなわち、導電性ボールへの印加電圧）とはほぼ比例関係にあることが分かる。(1)式に示すように、導電性ボールの静電容量Cがほぼ一定であるので、電圧印加によって導電性ボールに蓄積する電荷量Qが印加電圧Vに比例する。すなわち、導電性ボールが落下するまでの積算線量と導電性ボールに蓄積した電荷量はほぼ比例することが分かる。

$$Q = CV \quad (1)$$

4.3 複数個の導電性ボールによる検出感度の向上

図7は、1, 2, 4個の導電性ボールをそれぞれ一度に静電気力で浮上させ、検出器中心の位置で64mSv/hになるように低エネルギーX線を照射した時の、導電性ボールが落下するまでの積算線量と導電性ボールの落下個数との関係を示している。ただし、印加電圧は-6kV、X線透過フィルムの厚みは25μmであった。

浮上した複数個の導電性ボールは、入射した低エネルギーX線の電離作用で生成した正負イオンにより中和され、下から順番に落下する。その落下した個数をカウントすることにより、図7に示すように、入射した低エネルギーX線の積算線量を細かく読取ることができる。導電性ボールの個数が多くなると、低エネルギーX線の積算線量をより正確に検出できることが分かる。ただし、個数が多過ぎると一番下の導電性ボールにその上の導電性ボールの重さがすべて掛かるため浮上できなくなる。

4.4 検出器に入射するX線の線量率(X線強度)の影響

図8は、検出器内に4個の導電性ボールを封入して、金属球電極に-8kVを印加することにより、4個の導電性ボールを浮上させた後、検出器中心の位置で0.3, 2, 8, 32, 128mSv/hになるように低エネルギーX線をそれぞれ照射して、それぞれの積算線量と落下個数との関係を求めたものである。

それぞれの積算線量と落下個数はほぼ比例関係で、そのグラフは直線に近い。また、その各直線がほぼ一致していることから、入射する低エネルギーX線の線量率(X線強度)による積算線量と落下個数の関係への影響は少ないことが分かる。このことは、予め導電性ボールが落下するまでの積算線量と落下個数の関係のグラフを求めておけば、この検出器が、入射する低エネルギーX線の積算線量を概略ではあるが検出できることを現している。

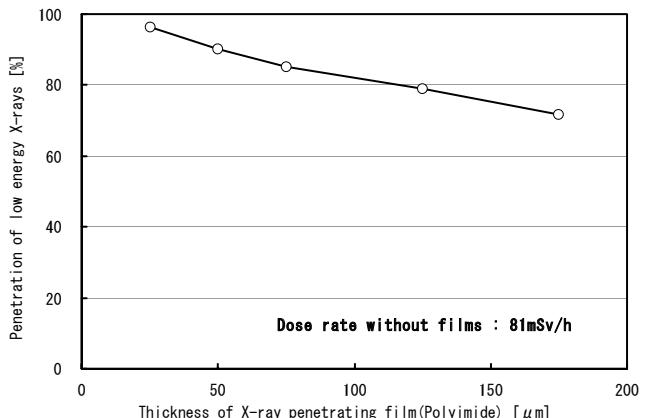


図4 低エネルギーX線透過フィルム厚みの透過率への影響
Fig.4 Influence on penetration by low energy X-ray penetrating film thickness.

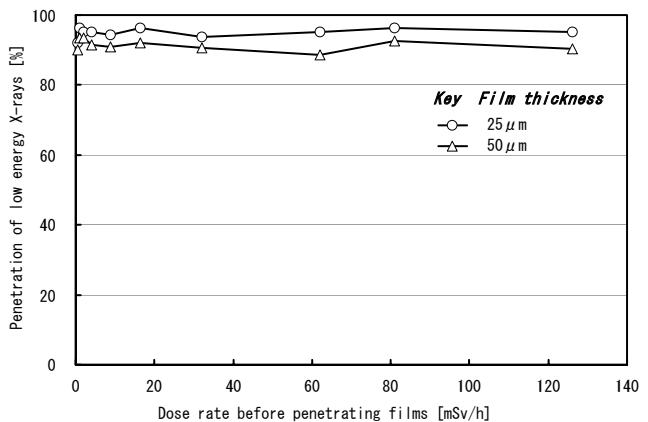


図5 入射X線線量率(X線強度)の透過率への影響
Fig.5 Influence on penetration by projected X-ray dose rate (X-ray intensity).

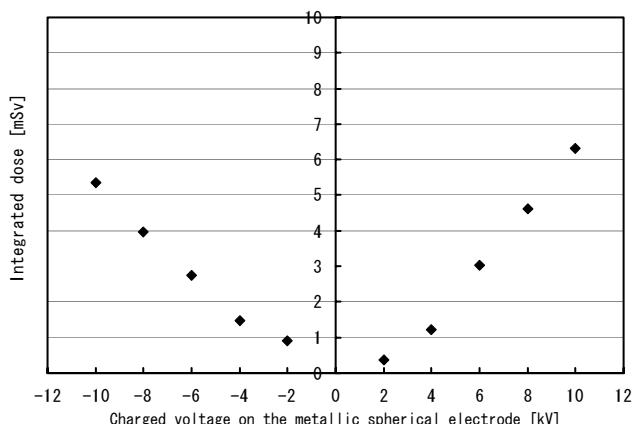


図6 導電性ボールが落下するまでの積算線量と金属球電極に印加する電圧との関係
Fig.6 Relationship between the integrated dose before one conductive sphere will drop and the charged voltage on the metallic spherical electrode.

4.5 散乱した低エネルギーX線の検出

図9は、検出器に直達した低エネルギーX線の線量を検出した場合と散乱X線の線量を検出した場合の積算線量と落下個数の関係を示している。実験では、検出器内に4個の導電性ボールを封入して、金属球電極に-8kVを印加することにより、4個の導電性ボールを浮上させた後、検出器中心の位置で直達X線と散乱X線の線量率がそれぞれ0.3mSv/hになるように照射して、それぞれの積算線量と落下個数との関係を求めた。

図9より、直達X線と散乱X線の積算線量と落下個数の関係のグラフは、ほぼ一致していることが分かる。すなわち、これは、この検出器が、コンプトン散乱のように散乱して低くなったエネルギーのX線も、用いた電離箱式サーベーメータと同等に検出可能であることを示している。用いたサーベーメータは、窓材として、厚さ0.0123mm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 4keV)を使用しているので、4keVの低エネルギーX線でも93%透過できる。これは、用いたサーベーメータは、4keVの低エネルギーX線でも検出可能であることを示している。従って、この検出器も、4keVの低エネルギーX線の検出が可能であることが分かる。尚、Mylarフィルムの透過率の計算に用いた質量減弱係数は、National Institute of Standards and Technology in USAのX-ray Attenuation Databasesから引用した。

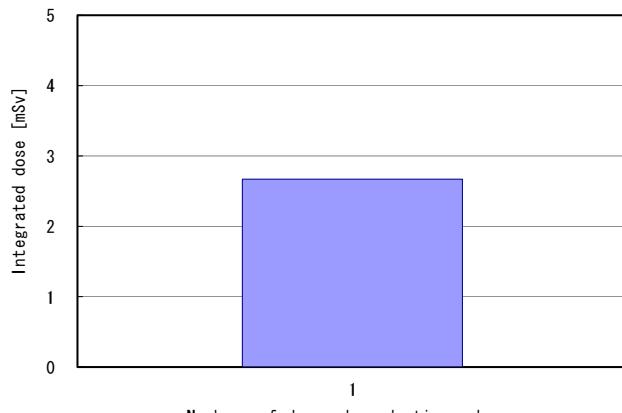
4.6 検出範囲の調整

図10は、検出器の金属球電極に、-6, -8, -10kVを印加した時のそれぞれの積算線量と落下個数の関係を示している。ただし、この実験は、4個の導電性ボールを浮上させ、検出器中心の位置で32mSv/hになるように低エネルギーX線を照射して行った。

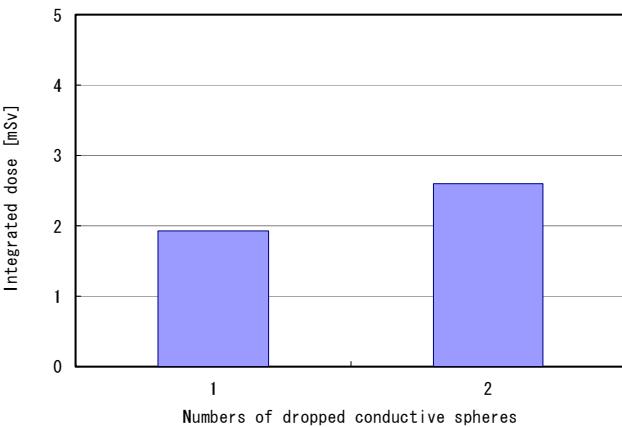
各印加電圧における積算線量と落下個数の関係は、ほぼ比例関係で、そのグラフは直線に近い。また、その直線の傾きは、ほぼ一致している。すなわち、図6からも予想されることだが、金属球電極への印加電圧を変えることにより、この検出器の検出範囲を調整できることが分かる。

5. まとめ

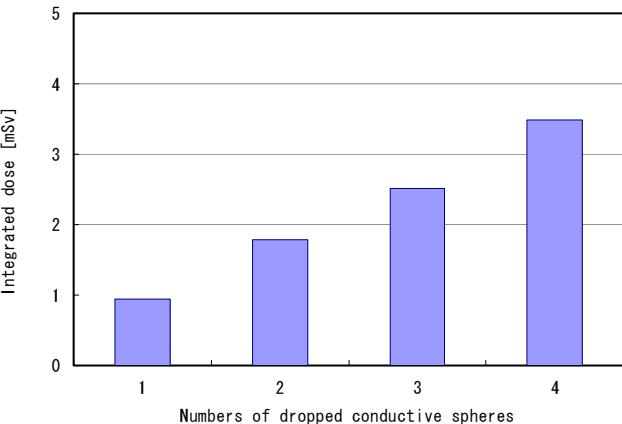
上述のように、考案した装着型低エネルギーX線検出器の検証を行った。その結果明らかになった以下の事項より、予め導電性ボールが落下するまでの積算線量と落下個数の関係のグラフを求めておけば、落下した導電性ボールの個数から、低エネルギー散乱X線の線量を簡易的に検出することが可能であることを確認した。



(a) 1 Sphere



(b) 2 Spheres



(c) 4 Spheres

図7 導電性ボールが落下するまでの積算線量と導電性ボールの落下個数との関係

Fig.7 Relationship between the integrated dose before conductive spheres will drop and the number of them dropped.

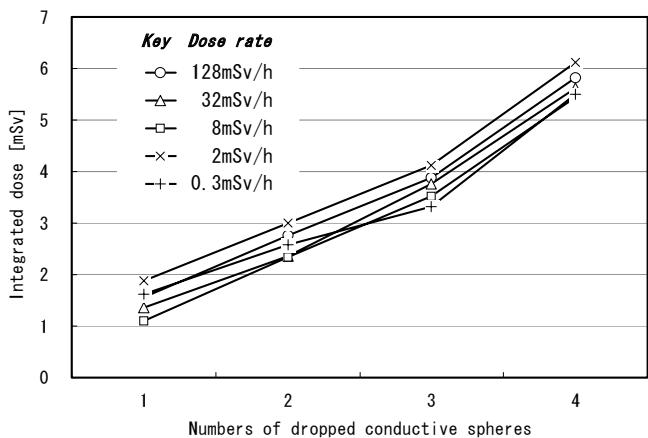


図8 検出器に入射するX線の線量率（X線強度）の影響
Fig.8 Influence of dose rate (X-ray intensity) of X-rays projected to the detector.

- ① 検出器の窓材のポリイミド樹脂フィルムは、低エネルギーX線の透過率が大きく、入射X線線量率（X線強度）による透過率への影響はほとんどない。
- ② 導電性ボールが落下するまでの積算線量と導電性ボールに蓄積した電荷量はほぼ比例している。
- ③ 複数個の導電性ボールを用いることにより、入射した低エネルギーX線の積算線量をより細かく読取ることができる。
- ④ 積算線量と落下個数は、ほぼ比例関係で、そのグラフは直線に近い。また、その積算線量と落下個数の関係は、入射する低エネルギーX線の線量率（X線強度）による影響をほとんど受けない。
- ⑤ この検出器は、4keVの低エネルギー散乱X線でも検出可能である。
- ⑥ 金属球電極への印加電圧を変えることにより、この検出器の検出範囲を調整できる。

参考文献

- 1) 鈴木政典, 和泉貴晴, 鋒治幸, 石川昌義:クリーンテクノロジー, **10**(2000)18
- 2) 浜松ホトニクス:フォトイオナイザL9490 取扱説明書
- 3) 稲葉仁, 岩波茂:第30回日本保険物理学会予稿集, p.3, 日本保険物理学会(1995)
- 4) 浜松ホトニクス:軟X線源C4870 取扱説明書

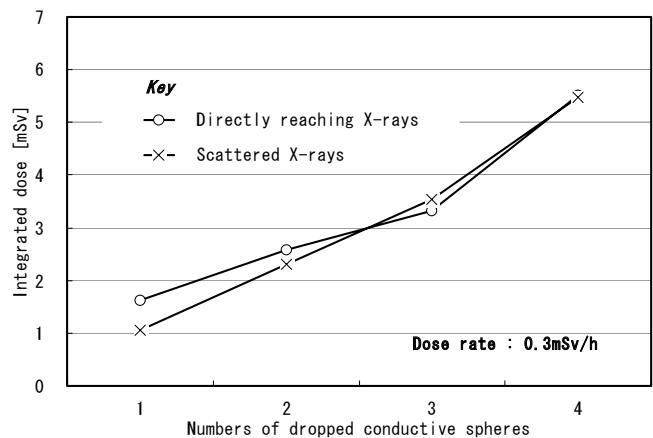


図9 検出器に直達した低エネルギーX線の線量を検出した場合と散乱X線の線量を検出した場合の積算線量と落下個数との関係
Fig.9 Relationship between the integrated dose by detecting directly reaching X-rays and scattered X-rays doses, and the number of spheres dropped.

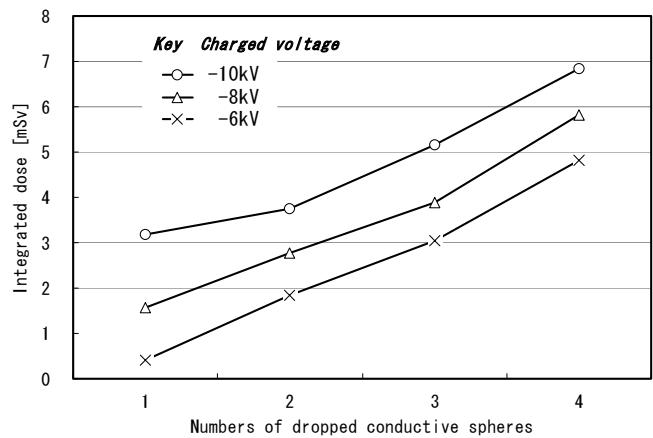


図10 積算線量と金属球電極に種々の電圧を印加したときの導電性ボールの落下個数との関係
Fig.10 Relationship between the integrated dose and the number of spheres dropped when charging different voltage on the metallic spherical electrode.