X線回折装置の放射線防護

西 健雄*, 山田典一*, 南 賢太郎*, 長谷川圭佑*, 三戸規生*

(1970年3月24日 受理)

Radiation Protection against X-ray Diffraction Apparatus

By Tatsuo NISHI,* Norikazu YAMADA,* Kentaro MINAMI,*
Keisuke HASEGAWA* and Norio MITO*

For the purpose of radiation protection against X-ray diffraction apparatus, the followings were carried out: (i) Measurements of the exposure rates of the primary and scattered X-rays produced from the apparatus, (ii) Determinations of the sensitivity of many types of surveymeters for the low energy X-rays from the apparatus, and (iii) Experiments on the shielding effect of many kinds of materials such as vinyl sheet, rubber, etc..

Exposure rate of about 600 R/min was observed for the primary X-rays at the sample holder of the apparatus under the normal operation. For the 8 keV X-rays emitted from the apparatus, the readings of an ionization chamber type surveymeter (ICS-101C) which was designed for X-rays were in good agreement with those of the Victoreen r-meter, whereas the readings of the ionization chamber type surveymeter made for γ -rays indicated about one half of those of the Victoreen r-meter. The shielding effects of several materials such as polyethylen, rubber, cotton cloth, etc. were measured. Among them, vinyl sheet had the greatest shielding effect.

Survey technique and assessment of absorbed dose are described in appendix.

I. 序 言

回折用 X 線装置に利用される X 線は、5~20keV 程度の低いエネルギーをもった特性 X 線が主である。したがって、このような X 線を通常の放射線管理に使用しているサーベイメータを用いて、測定および被曝評価を行なうことは困難である。また試料固定点における利

用 X 線錐の照射率は一般に非常に高く、そのためわずかな取扱い上の不注意によって、局所的な過剰被曝をうける危険性が多い。しかし、X 線エネルギーが低いので遮蔽は極めて簡単である。このような特徴を有する X 線回折装置の実際的な放射線管理計画や被曝防護上の留意事項などについては小西ら¹⁾によって述べられているが、実際の照射率の測定や被曝線量の評価法については触れていない。

本報告は、(1) X 線回折装置をいろいろな条件で運転した場合の利用線錐の照射率と装置周辺の散乱線による照射率分布、(2) 低エネルギー X 線に対する通常の放射線管理用サーベイメータの校正、および (3) 身近に

* 日本原子力研究所 大洗研究所 安全管理課：茨城県東茨城郡大洗町 (Health Physics and Safety Sec., Oarai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute: Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken)

あるビニールやポリエチレンなどの低エネルギー X 線に対する遮蔽効果について調べた結果を報告する。さらにこれらの結果にもとづいて、低エネルギー X 線に対する被曝評価と被曝防護の検討をおこなった。

II. X 線装置および測定器

使用した X 線回析装置は理学電機株式会社製 (Model D-3F, 連続定格 60kVp, 60mA) で、ターゲットとしてクロム (K_{α} ; 5.02keV) と銅 (K_{α} ; 8.04keV) を用いた。X 線管球側のソーラスリットはそのままにし、その後にあるダイバージェンスリットの幅を実験の目的によって変えた。標準線量測定に使用した測定器は、Victoreen condenser r-meter (70-A) で、チェンバーは、Model 576 と Model 651 である。

III. 測定および結果

1. 1 次 X 線および散乱線の測定

距離による 1 次 X 線の強度変化は、ターゲットとしてクロムと銅を用い、管電圧と管電流をそれぞれ通常の使用条件である 30kVp と 8mA に固定して測定した。ダイバージェンスリット (No. 2-4°) は、6.5mm × 10.8mm で X 線束がチェンバー (Victoreen Model 651) の有効経 (9mm ϕ) に入るようにして、管球窓より 40cm の距離まで測定した。

照射率の減弱を X 線管球窓からの距離の函数として求めた結果を Fig. 1 に示した。1 次 X 線の照射率はダイバージェンスリット出口において、クロムおよび銅ターゲットでおおの約 1,600R/min, 1,000 R/min である。調整および試料交換時の不注意等によって被曝が

問題となる試料台位置では、クロムおよび銅ターゲットの場合でおおの約 600R/min, 560R/min であり、X 線照射中の取扱いには十分な注意が必要である。図中点線で示してあるのは、ターゲットと組合せて用いられるフィルターを通した場合の照射率の減弱である。これらフィルターを用いることによって、X 線強度は試料台の位置で、フィルターのない場合と比較してそれぞれ 1/2,

Table 1 Calibration factors of various types of survey meters for 8keV X-rays

Survey meter	Reading	True dose* rate	Calibration factor
Ionization chamber (Aloka. ICS 101-C)	82.5mR/h	86.3mR/h	1.05
Ionization chamber (TEN. DR-130-1)	42mR/h	86.3mR/h	2.06
GM survey meter (Aloka. TGS-103B)	8×10^4 cpm	86.3mR/h	1.08×10^{-3} mR/h/cpm
GM survey meter (TEN. SM-110)	8 mR/h	32.4mR/h	4.05

*Measured by victoreen r-meter (Model 576)

1/2に減少する*。距離による X 線の減弱を示す Fig. 1 から、照射率を D 、シャッターからの距離を x とするとシャッターから 10cm 位まではクロムターゲットでは $D_{Cr} \propto x^{-0.8}$ 、銅ターゲットでは $D_{Cu} \propto x^{-0.5}$ と、10cm 以上ではクロムおよび銅ターゲットに対しておおの $D_{Cr} \propto x^{-1.5}$ 、 $D_{Cu} \propto x^{-0.7}$ の関係が近似的に得られ、照射率が距離の逆二乗で減弱しないのは、ターゲットの形状やソーラスリットにおける散乱の影響などによるものと考えられる。また銅ターゲット (8keV) にくらべてクロムターゲット (5keV) の場合の減弱が大きいのは空気による吸収の効果が大きいためである。

散乱線の強さや分布状況は、管電圧、管電流、試料の種類および X 線束に対する角度等によって変化すると考えられるが、ここでは、X 線装置の全ての遮蔽を取外した状態にして、銅ターゲットを用いて、通常の使用条件 (30kVp, 8mA) で散乱線分布測定を行った。試験試料は、タンタル (10×10×2mm) をアルミニウム試料支持板 (35mm×50mm×1.5mm) に接着したものを用

Fig. 1 Attenuation curve against distance

* 特性 X 線の強度は管電圧を V 、励起電圧を V_c とすると $(V - V_c)^{3/2}$ に比例して増加することが知られているが、管電圧を変えて測定した結果それが確認された。また X 線強度は管電流に比例して増加している。

い、試料の角度を X 線束に対して 45° にした状態で測定した結果を Fig. 2 に示した。この場合、2 次 X 線(回折 X 線)も含めているので、2 次 X 線の方では比較的照射率が高くなっている、また 1 次 X 線の方に照射率が高いのは、試料を透過した後の 1 次 X 線の寄与と考えられる。

Fig. 2 Distribution of exposure rate due to scattering radiation around the X-ray diffraction apparatus

管球のシールド部分からの漏洩を調べるために、シャッターを閉じた状態と開いた状態での漏洩を GM 管型(端窓型)サーベイメータ (TGS-103B型) で測定した。シャッターを閉じた状態でも、シャッターやフィルターのすき間から細いビーム状に放射する漏洩放射線が多少認められたが、シャッターを開いた状態では、特にシャッター部のすき間から多量の漏洩があった。Goniometer の周囲には、含鉛ゴム製のカバーが蛇腹式に覆っており、その上部はアルミニウムの蓋がしてあるので、ここからの漏洩は全く認められず、遮蔽は完全であった。

2. 放射線管理用サーベイメータの X 線に対する校正

低エネルギー X 線の線量測定は極めて難がしいが、通常の放射線管理においては、正確さよりもまず手軽に速く測定できるという点から、手近にある γ 線用のサーベイメータが使用されるので、銅ターゲットを用いて 8keV の X 線に対する各種サーベイメータの校正を行っ

Table 2 Mass absorption coefficient for various materials and Al equivalent

Materials	Thickness (mg/cm ²)	1st. H. V. L (mg/cm ²)	2nd. H. V. L (mg/cm ²)	Mass absorption coefficient (cm ² /mg)	Al equivalent (mg/cm ²)
Cellophane paper	2.02	60.6	123	11.4	0.50
Vinyl sheet	6.58	14.2	28.8	48.0	6.75
Polyethylene sheet	9.31	188	373	3.70	0.63
Cotton glove	12.9	92.8	194	7.50	2.40
Surgical glove (rubber)	18.1	110	220	6.50	2.39
Yellow robe (cotton)	23.6	104	205	6.70	4.25
Plastic board	226	120	238	5.80	
Akuric board	167	125	247	5.50	
Al (standard absorber)		14.5	28.5	48.5	1

た。標準にした測定器は、Model 576 (直径 47mm, 長さ 114mm) である。Table 1 にサーベイメータの種類と校正定数を示す。低エネルギー用電離箱型サーベイメータ (ICS-101 C 型) ではエネルギー特性は良く補正の必要はない。しかし X 線回折装置からの X 線は、線束が細くサーベイメータの有効窓面を十分カバーしない場合が多いので、照射率測定には特に注意が必要である。Cutie Pie 型のサーベイメータ (DR-130-1 型) では、半窓開の状態での校正定数を示してある。これは

窓以外の部分が厚さ 3mm のベークライトのため 8keV の X 線はほとんど遮蔽され、相対感度は約 1/2 になる。GM 管型サーベイメータでは、照射率の高い場合は測定できないが、検出感度は極めて高いので漏洩線の検出には適している。すなわち SM-110 型では、740 cpm* が、TGS-103B 型では、1,000 cpm がそれぞれ 1 mR/h に相当する。しかしエネルギー特性は悪く、mR/h で

* 窓面の Al キャップを取りはずして測定。

目盛である SM-110型** では相対感度が1/10に減じている。

3. 各種物質の X 線に対する遮蔽効果

身近にある材料や実験衣等について、銅ターゲットを用いて 8keV の低エネルギー X 線に対する遮蔽効果(減弱曲線)を調べ、それを基にして吸収係数を求めた。

アルミニウムの標準吸収板セットを用いて、8keV X 線に対して得られたアルミニウムの減弱曲線を Fig. 3 に示した。Fig. 4 は実験に用いた各物質の減弱曲線(百分率表示)を示したものである。Table 2 に実験に使用した物質とその厚さ*** および減弱曲線から求めた質量

Fig. 3 Attenuation curve of 8keV X-rays for aluminium standard absorber

Fig. 4 Attenuation curve for various absorbers

** Ra 源線校正してある。

*** 計量にはメトラ直示天秤 (Mettler B-6) を用いた。

吸収係数とアルミニウム当量を示す。表中の厚さは、実験に使用した物質1枚についての厚さを mg/cm^2 で表わしたものである。質量吸収係数 (μ_m) は、各減弱曲線の Initial slope から第1, 第2半価層 (HVL_1 , HVL_2) を求め、 $\mu_m \cdot \text{HVL} = 0.693$ の式を用いて計算したものである。これによって得られたアルミニウムの質量吸収係数は $48.5 \text{ cm}^2/\text{mg}$ であり、B. D. Cullity²⁾ の値と一致している。普通高エネルギー X 線に対しては銅当量や鉛当量が、低エネルギー X 線に対してはアルミニウム当量またはセロファン当量³⁾ が用いられるがここでは正確に計量されているアルミニウム吸収板をもとにアルミニウム当量を求めた。Fig. 3 に示した。Initial slope は、8keV の特性 X 線の減弱から得られたものである。吸収層が厚くなるとともに減弱曲線が Initial slope の傾斜からはずれるのは、制動放射による寄与である。

実験に用いたビニールとポリエチレンシートでは、遮蔽効果はビニールが極めて大きい。ポリエチレンは炭素と水素から成っているが、実験に用いた塩化ビニールはこれらの元素の他に塩素が重量比で約60%含まれており、その吸収が寄与するためと考える。また他に安定剤として鉛、カドミウム、アンチモン等が1~2%塩化ビニールには含まれている。RI 取扱用手袋のゴムでは、半価層は $110 \text{ mg}/\text{cm}^2$ で、手袋の約6枚に相当する。布手袋では半価層は7枚 ($92.8 \text{ mg}/\text{cm}^2$) である。ゴム手袋および布手袋はいずれも1枚では約10%減少するだけで、低エネルギー X 線であってもあまり防護の役目を果たさない。黄色実験衣の半価層は、約4枚 ($104 \text{ mg}/\text{cm}^2$) で、1枚の減弱は17%である。

IV 結 語

この種の X 線回折装置の放射線管理を行なうにあたっては、低エネルギー用サーベイメータを持に用意しなくても、手近にあるサーベイメータを利用して十分測定できることがわかった。漏洩線の検出には、検出感度の高いGM管型サーベイメータが有効であり、また照射率の測定には、 β 線測定用窓を開けて用いることにより、エネルギー特性の良い Cutie Pie 型サーベイメータが有効である。ただし、細いビーム状の X 線による被曝線量を測定する場合は、ビームの測定器への入射状態を考慮しながら測定しないと、過小評価をする危険がある。

実際の X 線防護になると、数 kV 程度の低エネルギー X 線では、ごく薄い 1mm 程度の鉛で十分遮蔽できるので、見掛けの厚いゴム手袋等を二重に重ねておけば、

たとえ誤って1次 X 線束の内に手を入れても大丈夫のように安易に考えがちであるが、我々の測定ではこれはあまり遮蔽効果が認められなかったの、やはり取扱いの際は作業者が操作に十分な注意を払う必要がある。

本実験に際して助言を与えられた当研究所安全管理課長福田整司氏といろいろと御援助下さった照射3課村岡進氏ならびに利用開発室の川上泰氏に感謝致します。

Appendix

放射線管理における低エネルギー X 線測定と被曝線量評価

γ線用サーベイメータを用いて X 線回折装置から発生する低エネルギー X 線の測定を行なう場合に、問題となる測定値の信頼性を示す指標 (H) についてのべる。

現在使用している電離箱型サーベイメータの電離箱は Fig. 5 (a), (b) に示すように、比較的縦方向に長い電離箱であるが、Aloka・ICS-101 C 型は縦方向に短かく低エネルギー X 線の測定に有効な構造になっている。一般に電離箱型サーベイメータで X 線測定を行なう場合、電離箱の入口における X 線エネルギーフルエンス Q_0 と、電離箱の出口における X 線エネルギーフルエンス $Q_0 \exp(-\mu^A_i X)$ との比 (H) が 1 に近くなければならない。X 線エネルギーが高い場合には μ^A_i が小

Fig. 5 Dimention of Chambers

さいので、電離箱が長くても電離箱内における X 線エネルギーの減弱は十分小さく H は 1 に等しい。したがって測定点 (電離箱の入口) における照射率を正しく示すことになる。

$$H = \frac{Q_0}{Q_0 \exp(-\mu^A_i x)} = \frac{1}{\exp(-\mu^A_i x)} \quad \dots (1)$$

ただし Q_0 : 電離箱の入口における X 線エネルギーフルエンス (erg/m²)

μ^A_i : 低エネルギー X 線に対する空気の実の吸収係数 (cm⁻¹)

x : 電離箱の長さ (cm)

しかし 5keV~10keV の低エネルギー X 線の空気に対する真の吸収係数は Table 3⁴⁾ に示すように非常に大きい。電離箱の長さが長い場合には H の値が 1 に近くならず、したがって測定点 (電離箱の入口) における照射率を正しく示すことができず、単に電離箱全体の容積で平均化した照射率を示すことになる。それゆえ、低エネルギー X 線の照射率を正しく求めるために、β線の場合と同様に外挿電離箱が必要になる。X 線回折で主に使用する X 線エネルギーは 5keV と 8keV であり、使用している電離箱の長さは 16cm (TEN) と 7cm (Aloka) である。したがってこれらのエネルギーに対して

Table 3 True absorption coefficient and H.V.L. for air and water⁴⁾

X-ray energy		air*		water	
(A°)	(keV)	μ^A_i (cm²/g)	H.V.L. (cm)	μ^W_i (cm²/g)	H.V.L. (cm)
0.6	20.7	0.75	720	1.0	0.69
0.7	17.7	1.3	410	1.5	0.46
0.8	15.5	1.6	340	2.1	0.33
0.9	13.8	2.1	260	2.8	0.25
1.0	12.4	2.6	210	3.8	0.18
1.5	8.26	8.7	62	12	0.058
2.0	6.2	21	26	28	0.025
2.5	4.96	39	14	51	0.014
3.0	4.14	63	8.5	85	0.0082
3.5	3.54	96	5.6	129	0.0054
4.0	3.10	140	3.8	191	0.0036
4.5	2.76	200	2.7	261	0.0027
5.0	2.48	270	2.0	347	0.0020
6.0	2.07	430	1.2	590	0.0012

* 760mmHg, 0°C

Table 4 Figure of merit H for measurement of low energy X-rays

keV	TEN. ionization chamber. (length 16cm)	Aloka. ionization chamber. (length 7cm)
8	1.2	1.1
5	2.2	1.4

(1) 式の H の値を求めてみると, Table 4 に示すようになる。Victoreen のチェンバー 576 を標準にして 8keV の X 線で Aloka の電離箱を校正した結果, 校正定数 1.05 となり良い値を示した。このような値を示すことは Table 4 から推測できる。また Aloka の電離箱の 8keV の校正値を 5keV の X 線測定に利用すると多少誤差が生じるであろうが, Table 4 から推測して実用上問題はないと考える。TEN の電離箱は低エネルギー X 線測定に不都合な入射窓になっているので校正値はよくない。なおこれらの電離箱型サーベイメータによる低エネルギー X 線測定は, plane intensity の測定に近いものであるから, 散乱 X 線の測定などを行なうときには照射率の評価に注意すべきである。

次に人体の軟組織を水と仮定した場合の低エネルギー X 線による被曝線量評価は次のようになる。低エネルギー X 線の組織内における減弱は非常に強く 8keV の X 線は軟組織の 3mm で約 1/32 に減弱する (Table 3 参照)。したがって β 線による被曝線量計算と同じように計算した方がよい⁵⁾。X 線の平行ビームが組織に垂直に入射していると考え組織中では指数関数的に減弱していると仮定し, エネルギーフルエンスの組織内での減少を ΔQ とすると, 組織のある深さ $x(\text{g/cm}^2)$ の点における吸収線量 D_x は次の式で示される。

$$D_x = \frac{\Delta Q}{\Delta x} = \frac{Q_0 \exp(-\bar{\mu}_t x) - Q_0 \exp[-\bar{\mu}_t (x + \Delta x)]}{\Delta x} \\ \approx Q_0 \bar{\mu}_t \exp(-\bar{\mu}_t x) \quad (\text{erg/g}) \quad \dots \dots (2)$$

ここで Q_0 : 皮膚表面に入射する X 線エネルギーフルエンス (erg/cm^2)

$\bar{\mu}_t$: 低エネルギー X 線に対する組織の吸収係数 (cm^2/g)。組織を水と仮定すれば, Table 3 の $\bar{\mu}_t$ に等しい。

Δx : 組織内の x の点における微小距離

(g/cm^2)

電離箱型サーベイメータによる測定値を R_0 (レントゲン) とすれば, Q_0 は次のように示される。

$$Q_0 = R_0 \frac{87}{\bar{\mu}_t} \quad ((\text{erg/cm}^2)) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし, $\bar{\mu}_t$ は低エネルギー X 線に対する空気の吸収係数 (cm^2/g) である。(2) および (3) 式より吸収線量をラド単位で求めると次式となる。

$$D_x \approx 0.87 \frac{\bar{\mu}_t}{\bar{\mu}_t} R_0 \exp(-\bar{\mu}_t x) \quad \dots \dots \dots (4)$$

たとえば, クロムターゲットを使用して 5keV の特性 X 線を取扱っている人が, 電離箱型サーベイメータで測定して 600 (R/h) の X 線ビームで 1 分間被曝したとすると, 不感層直下における被曝線量 D_x は (4) 式より次のように求められる。

$$D_x = 0.87 \times \frac{51}{39} \times 10 \times e^{-51 \times 7 \times 10^{-3}} = 8 \text{ rad}$$

QF を 1 とすれば 8rem と考えて良い。

参 考 文 献

- 1) 小西恵美子, 小野道美, 安斉育郎, 吉沢康雄; 回折用 X 線装置の放射線管理計画に関する考察, 保健物理, 2, 57 (1967)
- 2) B.D. Cullity (松村源太郎訳): "X 線回折要論", P 471, アグネ社 (1966)
- 3) 操担道, 柳頼敏雄, 木村幾生共著; "レントゲンの取扱方" P 162 裳華房 (1960)
- 4) 高橋喜久雄; "X 線物理実験法", P 124, 丸善 (1941)
- 5) 南 賢太郎, 福田整司; 保健物理, 1, 20 (1966)

秋の原子力学会分科会について

日本原子力学会誌 12巻 5号 298頁で既に御存知と存じますが, 秋の保健物理分科会が下記の要領で開かれます。第6回保物発表会も計画が発表されておりますが, この分科会も会員皆さんのお役に立つように願っております。

記

日時 昭和45年 9月24・25日

場所 東海大学 佐々木校舎