

JAERI-M

7891

照射用大出力X線発生装置における  
線量評価法

1978年10月

田島 訓・平尾 敏雄・田中 隆一・田村 直幸

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

照射用大出力X線発生装置における線量評価法

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

田島 訓<sup>+</sup>・平尾 敏雄・田中 隆一・田村 直幸

(1978年9月6日受理)

大出力X線発生装置を用いて照射された物質中の吸収線量を簡便に評価する目的で、半価層測定、空洞電離箱の壁効果による測定、X線スペクトル測定など種々の方法によってX線の実効エネルギーを求めた。各測定結果の考察を通して実際の照射条件に適合した実効エネルギーは150 kVの管電圧に対して95 keVと評価された。この値を基にして電離箱、フリッケ線量計、PMMA線量計、CTA線量計などを用いて線量分布の特性を調べるとともに被照射体の種類、大きさ、厚さ、形状などのパラメータを考慮した一般的な吸収線量算出法を見出した。

---

+ ) 現在東海研究所物理部タンデム加速器準備室

Dose Evaluation Method of High-Power

X-Ray Generator for Irradiation

Satoshi TAJIMA<sup>+</sup>, Toshio HIRAO, Ryuichi TANAKA and

Naoyuki TAMURA

Pilot Scale Research Station,  
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, JAERI

(Received September 6, 1978)

For the purpose of evaluating absorbed dose in the material irradiated with a high-power X-ray generator the effective energies of X-rays were obtained by various methods such as the HVL measurement, the ionization measurement based on cavity theory, and X-ray spectrometry. Through a comparison between the results of experimental values, the effective energy matching with practical irradiating condition was evaluated. It was 95 keV for tube voltage of 150 kV. Based on this value, the dose characteristics were obtained with ionization chambers, Fricke dosimeter, polymethylmethacrylate dosimeter and cellulose triacetate dosimeter, and a general formula for evaluating the absorbed dose was proposed with a consideration of the composition, the size, and the thickness of the irradiated material.

Keywords: High Power X-ray Generator, Irradiation, Absorbed Dose Evaluation, Effective X-ray Energy, Half-Value-Layer, Ionization Measurement, Cavity Theory, Spectrometry, Fricke Dosimeter, Polymethylmethacrylate Dosimeter, Cellulose Triacetate Dosimeter.

---

<sup>+</sup>)Division of Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 照射条件 .....	2
2.1 X線発生部の構造 .....	2
2.2 出力安定度 .....	2
2.3 基準照射条件の設定 .....	2
3. 実効エネルギーの評価 .....	4
3.1 実効エネルギー評価の方法 .....	4
3.2 半価層による評価 .....	4
3.3 空洞電離箱の壁効果による評価 .....	6
3.4 エネルギースペクトルによる評価 .....	10
3.5 標準的なX線源との比較による評価 .....	13
3.6 エネルギー測定結果の検討 .....	13
4. 基準点における照射線量率の測定 .....	16
4.1 平行平板型電離箱による測定 .....	16
4.2 フリッケ線量計による測定 .....	17
4.3 測定結果 .....	18
5. 深部線量分布 .....	20
6. 後方散乱の影響 .....	22
7. 照射線量率分布 .....	22
7.1 高さ方向の分布 .....	22
7.2 照射面内の分布 .....	24
8. 線量算出法 .....	28
9. あとがき .....	31
参考文献 .....	31

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Condition of irradiation .....	2
2.1 Structure of X-ray tube .....	2
2.2 Stability of X-ray output .....	2
2.3 Standard condition of irradiation .....	2
3. Evaluation of effective X-ray energy .....	4
3.1 Evaluation method of effective X-ray energy .....	4
3.2 Evaluation from half-value-layer .....	4
3.3 Evaluation from the wall effect in cavity chamber .....	6
3.4 Evaluation from X-ray energy spectra .....	10
3.5 Evaluation from comparison with the standard X-ray source .	13
3.6 Discussion on the results of measurements .....	13
4. Measurement of exposure rate at the reference point .....	16
4.1 Measurement with parallel-plate ionization chamber .....	16
4.2 Measurement with Fricke dosimeter .....	17
4.3 Result of measurement .....	18
5. Depth dose distribution .....	20
6. Influence of backscatteing .....	22
7. Exposure rate distribution .....	22
7.1 Exposure rate distribution in longitudinal direction .....	22
7.2 Exposure rate distribution in the irradiated plane .....	24
8. Calculation method of absorbed dose .....	28
9. Summary .....	31
Reference .....	31

## 1. ま え が き

中硬X線によって照射された物質中の吸収線量分布の評価法については、放射線治療分野ではすでに確立されており、銅やアルミニウムの半価層、線源から物質の表面までの距離(SSD)、照射野(field size)などをパラメータとするテーブルが与えられている<sup>1)</sup>。しかし、大線量の工業的あるいは研究的な照射を目的とした大出力X線の照射においては照射方式、被照射体の種類などが放射線治療における場合とは異っており、従来の方法は適用困難である。

高崎研究所の照射用大出力X線発生装置に関する線量評価法については前報<sup>2)</sup>において簡単な実験結果を基に検討を行ったが、被照射物質の種類、大きさ、形状、厚さなどの多くの照射パラメータを考慮した方法を見出すに到らなかった。しかし、放射線化学をはじめとする多様な照射利用を考えると、これらのパラメータを含む線量評価の手段を見出さなくてはならない。

このため工業的な照射用X線源に対して適用し得る線量評価法として、X線の実効エネルギーを求め、これを基にして空気に対する被照射体の質量エネルギー吸収係数の比を求めることにより、吸収線量を導く方法を管電圧150 kVの標準的な照射条件に対して試みた。この方法の信頼性は連続スペクトルを有する中硬X線に対しては確認されていないが、これ以外の簡便な方法は現在のところ見あたらない。したがって、まず線量評価に対する0次近似としての簡便法を与えることを目的として、この方法を採用した。

実効エネルギーについては簡単な半価層測定による推定値が前報に与えられているが、その後のターゲット部分の改造によって銅フィルターの厚さは増加している。また、後述の本装置の構造的な特殊性から、半価層やエネルギースペクトルから得られる実効エネルギーは実際の照射条件に十分合致しないという問題がある。したがって、今回は半価層測定、異った壁材を用いた空洞電離箱測定、エネルギースペクトル測定などのいくつかの方法を併用して実効エネルギーを求め、それらの比較検討から実際の照射条件に合致した実効エネルギーを決定した。

これによって、照射場の基準点における照射線量率の値付けを電離箱およびフリッケ線量計を用いて行った。また、水平方向および高さ方向の相対的な照射線量率分布、後方散乱効果、ならびに深部線量分布をPMMA線量計、CTA線量計、およびシリコン接合型固体電離箱を用いて測定した。これらの測定結果を基にして被照射物質の種類、大きさ、形状および厚さなどの照射パラメータを考慮した一般的な吸収線量の算出式を提案した。

本報告では実効エネルギーの評価、線量測定、および線量の算出式について述べる。

## 2. 照射条件

### 2.1 X線発生部の構造

X線発生部から空気中に取り出されるX線は、アノード、冷却層などの構造材を通過することにより強度が低下する。また、エネルギースペクトルも高エネルギー側にシフトする。このためX線発生部の構造は、被照射物質の吸収線量分布に対して重要な意味を持つ。

本装置のX線発生部は Fig. 1 に示すように、それぞれ同一のジオメトリーを持った2組のカソードおよびアノードから構成される。カソードはタングステンフィラメント16本が並列に配置され、 $30 \times 15$  cmの金ターゲットに均一な強度の電子線を入射させる構造になっている。アノード部は Fig. 2 に示すように、X線を発生させるための金ターゲット（厚さ $30 \mu$ ）、2層の銅フィルター（厚さ計 $1.4$  mm）、冷却水の層（ $1.5$  mm）および補強リム（銅）から構成される。アノードに入射する電子線はすべて金箔中で吸収され、制動放射X線を発生する。X線はアノード部による自己吸収を受け、さらに $1.4$  mmの銅および $1.5$  mmの水層を通過して空気中に取り出される。一部のX線は補強リムにより吸収される。この補強リムの存在は、X線のエネルギースペクトルに複雑な影響を及ぼす。

### 2.2 出力安定度

出力X線の強度は、装置の管電圧および管電流に依存する。本装置の管電圧は、商用電源の電圧変動にかなりの影響を受ける。電源電圧が安定している場合、管電圧 $150$  kV、管電流 $400$  mAの出力において、管電圧の変動は約 $\pm 1.2\%$ （標準偏差 $\delta$ ）であり、同条件でのX線の強度変動の割合は約 $\pm 3\%$ （標準偏差 $\delta$ ）である。このため測定に際しては、X線の放射線場を乱さない位置に線量率モニタを取り付け、測定値をモニタの測定結果を用いて補正した。

### 2.3 基準照射条件の設定

線量計をセットする位置は、ターゲット中心の $10$  cm下方とし、この点を測定の基準点とした。基準点とその後方のコンペアとの距離は $15$  cmで常に一定である。測定時の基準管電圧は $150$  kVとした。管電流は照射線量率に比例することがすでに確かめられているが、主として $400$  mAで測定した。

照射線量あるいは線量率を再現性よく測定するために次の諸点に留意した。

- 1) 管電圧を手動操作により一定に保つ。
- 2) X線強度の変動に対しては、線量率モニタの値を使用して補正する。
- 3) 線量計をセットする位置およびその後方のジオメトリーを一定に保つ。

なお、本装置のアノード部は2組あるが両者の形状は同一であるので、今回の測定ではその一方（左側）のみを使用した。



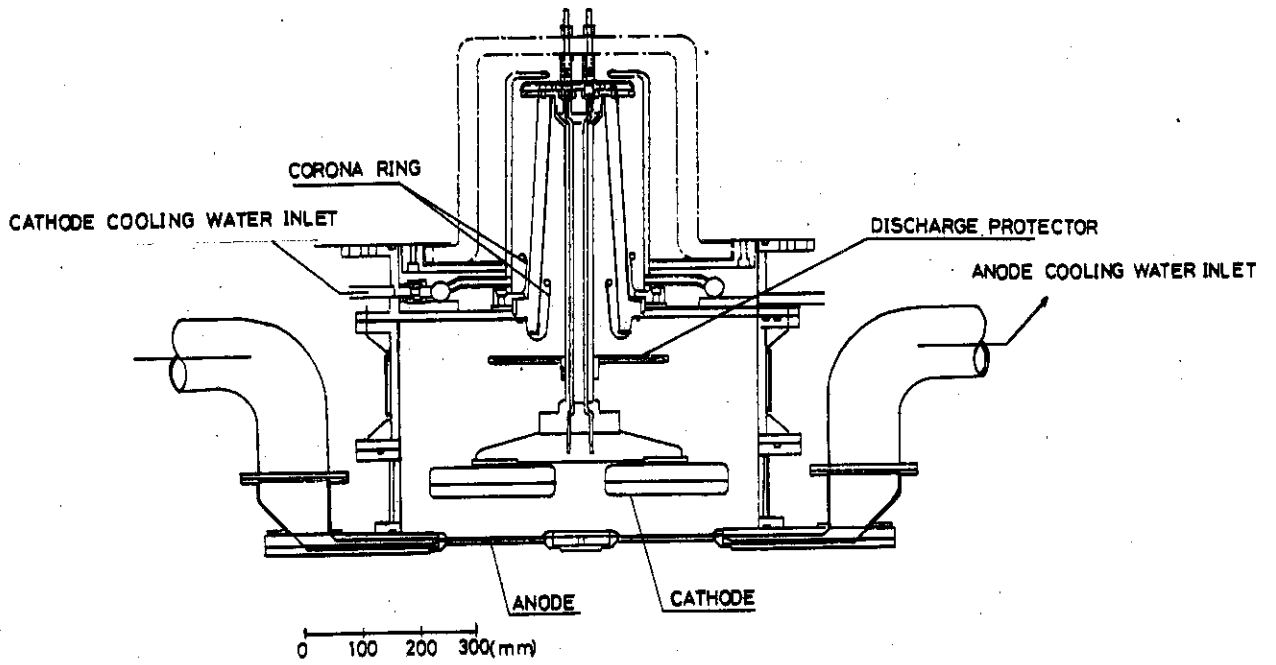


Fig. 1 Sectional view of X-ray tube.

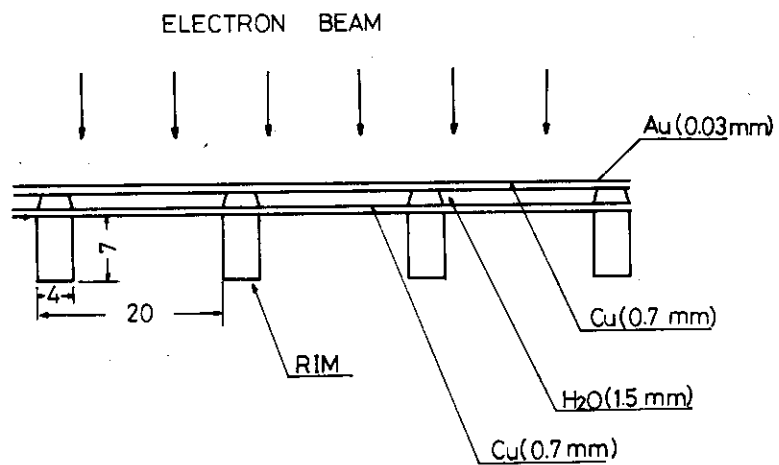


Fig. 2 Sectional view of the anode.

### 3. 実効エネルギーの評価

#### 3.1 実効エネルギー評価の方法

照射線量  $X$  から被照射物質の吸収線量  $D$  を求めるには一般に次式が与えられている。

$$D = 0.869 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} X \quad (1)$$

ここで  $(\mu_{en}/\rho)_m$ ,  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$  はそれぞれ被照射物質と空気の質量エネルギー吸収係数である。連続エネルギー分布を持つ X 線に対して(1)式を厳密に適用するには、エネルギースペクトルを実測し、 $(\mu_{en}/\rho)_m / (\mu_{en}/\rho)_{air}$  の全エネルギー成分にわたる実効平均値を算出しなければならないが、この方法は極めて面倒である。このため一般に X 線に対しては、質量エネルギー吸収係数が単一エネルギーの光子に対するそれと等しくなる実効エネルギーを求める方法がとられる。

X 線の実効エネルギーの測定は、銅の X 線吸収曲線の第一半価層から求める方法が一般的である。この方法は narrow beam geometry を前提としており、broad beam geometry に対しては信頼性に欠ける。また、異った壁材の空洞電離箱を使用し、空洞理論によって得た吸収線量率の比から実効エネルギーを求める方法は、低エネルギー光子に対しては多少精度は落ちるが、beam geometry に依らず実際の照射条件に適合した値を得ることができると考えられる。

このほか、NaI スペクトロメータを使用して、直接 X 線のエネルギースペクトルを測定する方法およびすでに実効エネルギーが与えられている標準的な X 線源（電総研）の測定結果との比較から推定する方法も試みた。

本章では各方法による評価および、測定結果の比較検討について述べる。

#### 3.2 半価層による評価

Narrow beam geometry の X 線に対する実効減衰係数  $\mu_{ef}$  は、銅に対する吸収曲線を測定し、その結果得られる第一半価層 (HVL) から  $\mu_{ef} = \ln 2 / \text{HVL}$  によって求めることができる。narrow beam geometry の場合は、吸収板中でのビルドアップおよび斜め入射による X 線の平均 pass length の増加の影響を受ける<sup>2)</sup>。ビルドアップ係数を  $B$ 、平均 pass length の増加係数を  $\alpha$  とすれば、 $\mu_{ef} = (\ln 2 + \ln B) / (\text{HVL} \cdot \alpha)$  と書き換えられる。すなわち、ビルドアップは実効減衰係数を増加させ、また平均 pass length の増加は実効減衰係数を減少させる方向に働くが、これらの係数を実際に求めるのは困難である。一方、narrow beam geometry の場合には実際の照射条件を忠実に反映しないという問題があるが、これについては 3.6 で詳しく述べる。

測定は次の方法で行った。

- (1) broad beam geometry - Victoreen 型電離箱 (603 型) を基準点にセットし、60×

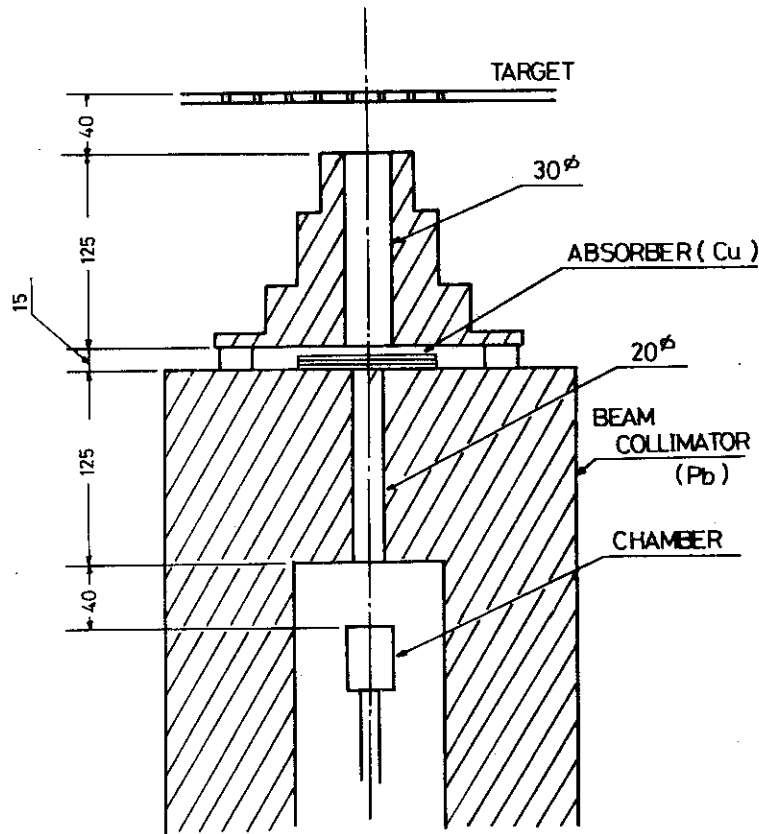


Fig. 3 Arrangement of narrow beam geometry.

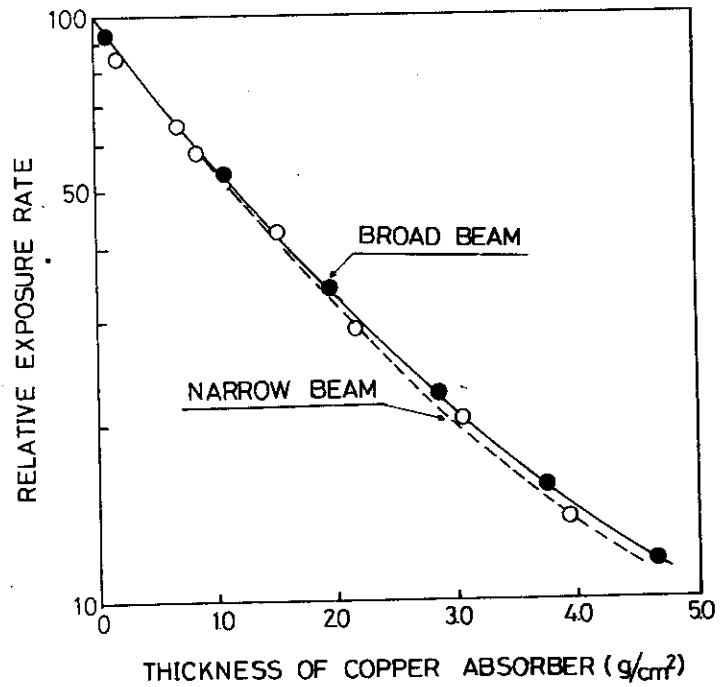


Fig. 4 Relative exposure rate as a function of copper absorber thickness at 150kVp.

40cmの吸収板（銅）の厚さの増加に伴う照射線量率の減少を測定した。

- (2) narrow beam geometry - Fig. 3に示すような鉛製のビーム・コリメータを使用し、内部にグラファイト壁の円筒型電離箱（20C型）を挿入して narrow beam geometry のもとで同様な測定を行った。コリメータの内径は細い方が良いが、電離箱の応答感度を考慮して20～30mmとした。

管電圧150kVでの broad および narrow beam geometry に対する銅の吸収曲線を Fig. 4に示す。その結果第一半価層の値はそれぞれ1.33, 1.24mm (Cu)であった。このことから吸収曲線は beam geometry にそれほど影響されないことがわかった。

### 3.3 空洞電離箱の壁効果による評価

異った壁材を持つ空洞電離箱の吸収線量の比から実効エネルギーを求める方法は、電離箱が被照射体と同一条件で照射野に置かれているという点で他の方法よりも優れている。

Bragg - Gray の空洞原理の成立する空洞電離箱の吸収線量Dは次式で与えられる。

$$D = J \cdot W \cdot (\overline{S_m / S_g}) \quad (2)$$

ここでJは電離箱気体中の電離密度、Wは電離気体中で1イオン対を生成するのに必要な平均エネルギーであり、ここで問題としている光子のエネルギー領域では一定と見なせる。 $(\overline{S_m / S_g})$ は壁物質の空気に対する質量阻止能比である。

一方、電離箱の吸収線量Dは、照射線量Xが与えられれば(1)式で与えられる。したがって、壁物質が $m_1$ ,  $m_2$ の2種の電離箱を同じ照射線量率の位置に置けば

$$\frac{D_{m1}}{D_{m2}} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_{m1}}{(\mu_{en}/\rho)_{m2}} = \frac{J_1 \cdot (\overline{S_{m1} / S_{air}})}{J_2 \cdot (\overline{S_{m2} / S_{air}})} \quad (3)$$

となる。電離電流が実験的に与えられ、かつ質量阻止能比が与えられれば、実効的な質量エネルギー吸収係数の比が(3)式から得られる。電離箱気体の電離密度の比 $J_1 / J_2$ は、照射および測定条件が同一ならば、測定電流の比 $I_1 / I_2$ で置き換えることができる。ただし、後述の通り電離箱壁によるX線の強度減衰に対する補正係数 $K_a$ 、イオン再結合損失に対する補正係数 $K_s$ を考慮する必要があるので、実効エネルギー吸収係数の比は(4)式で与えられる。

$$\frac{(\mu_{en}/\rho)_{m1}}{(\mu_{en}/\rho)_{m2}} = \frac{I_1 \cdot K_{a1} \cdot K_{s1} \cdot (\overline{S_{m1} / S_{air}})}{I_2 \cdot K_{a2} \cdot K_{s2} \cdot (\overline{S_{m2} / S_{air}})} \quad (4)$$

電離電流の測定はグラファイト、アルミニウムおよび銅の壁材で構成される円筒型空洞電離箱<sup>3)</sup> (20C, 20Alおよび20Cu)を Fig. 5に示すように順次基準点にセットし、管電圧150kV、管電流400mAの定常出力条件のもとで行った。各電離箱の特徴を Table 1に示す。各電離箱に対する $K_a$ ,  $K_s$ , および $(\overline{S_m / S_{air}})$ の決定については次のように行った。

#### 1) 壁に対する減衰補正

壁物質による強度減衰に対する補正係数 $K_a$ は単純な形状の場合は計算から求められるが、今回の測定では電離箱が円筒型であること、入射光子が連続スペクトルをもつことおよび広い入射角度分布をもつことなどにより計算は困難である。

このため、電離箱の厚さと電離電流の関係を測定によって求め、壁の厚さ零における電離電流

Table 1. Cylindrical-cavity ionization chambers with different walls.

Chamber	Wall material	Ionization volume (ml)	Wall thickness (mm)
20 C	Graphite	8.20	3.0
20Al	Aluminium	8.20	1.5
20Cu	Copper	8.20	0.5

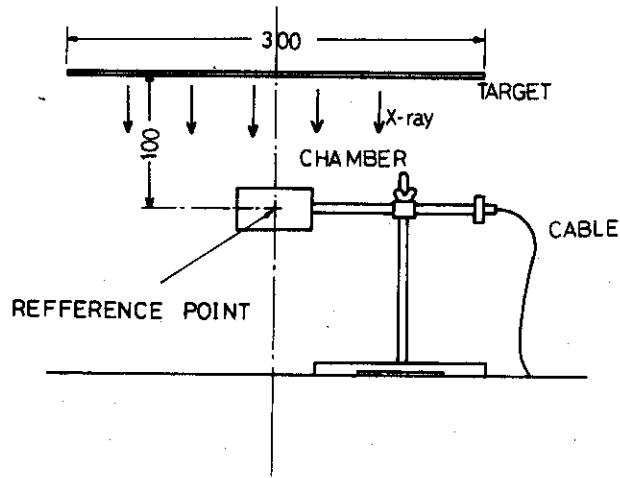


Fig. 5 Geometrical arrangement of the cylindrical-cavity ionization chamber.

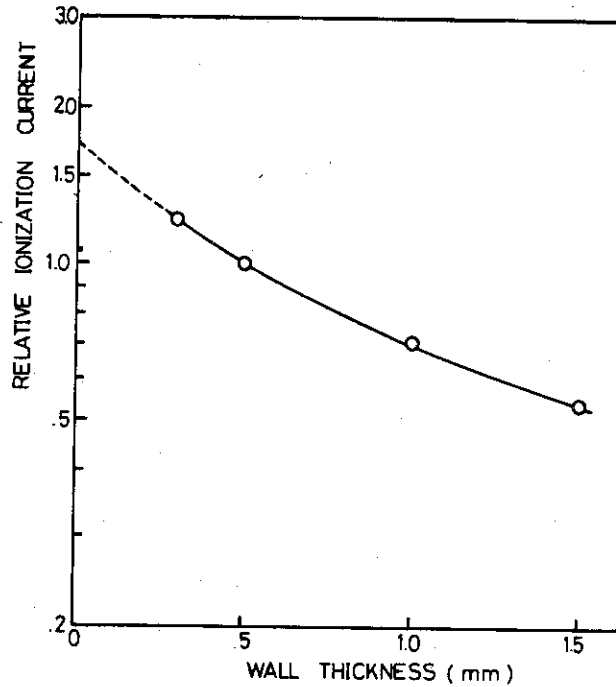


Fig. 6 Correction for the wall thickness of the cylindrical-cavity ionization chamber.

を外挿により求めて  $K_a$  を決定した。Fig. 6 に銅壁の電離箱 (20 Cu) に対する壁の厚さと電離電流との関係を示す。

### ii) 再結合補正

この実験に使用した円筒型電離箱に対する再結合補正係数  $K_s$  としては、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線の場合次の経験式が与えられている。

$$K_s = 1 + 0.24 \times 10^6 I^3 \quad (5)$$

ここで  $I$  は印加電圧が  $-1000\text{V}$  の時の電離電流 (A) の測定値である。

(5) 式の低エネルギー光子への適用性を確認するため、他の電離箱よりも 1 桁程度電離電流の大きい銅壁の電離箱を用いて、管電圧  $150\text{ kV}$ 、管電流  $50 \sim 400\text{ mA}$  の出力条件の下で管電流を測定した。Fig. 7 に管電流と(5)式を用いて再結合補正を行った後の電離電流との関係を示す。補正した結果 ( $I_k$ ) は依然として管電流に対して *under linear* な傾向を示すので(5)式のみによる補正では十分でない。このため立上りの直線部分を高電流へ外挿して補正曲線 A を求め、これを基にして測定された電流の再結合補正を行うことにした。

### iii) 質量阻止能比

$100\text{ keV}$  程度の低エネルギーでしかも連続スペクトルを有する光子に対する質量阻止能比を空洞原理によって厳密に求めることは厄介である。低エネルギーでは、2次電子の飛程が短くなるために空洞電離箱の *cavity size* の依存度が大きくなるのが問題であり、この影響を正確に評価することは、ほとんど不可能である。しかし、炭素に対する銅の実効エネルギー吸収係数比を(4)式から求め、これによって X 線の実効エネルギーを評価する場合、5%程度の質量阻止能の不確定さは、 $100\text{ keV}$  程度の実効エネルギーに対しては、結果的に1%程度の不確定さとしてしか現われない。したがって、ここではこれらの影響を考慮せず、Spencer-Attix 理論をもとにして与えられている質量阻止能比<sup>4)</sup>を低エネルギー側へ外挿した場合の概算値として求めた。簡単のために、概算にあたっては  $100\text{ keV}$  の単一エネルギー電子線源を仮定し、*cavity* をちょうど横切るのに必要な電子の平均エネルギー  $\Delta$  を  $30\text{ keV}$  とみなした。2次電子の発生時のエネルギーに比べて  $\Delta$  は無視し得ないほど大きいので、*cavity* 内の光子と空気との相互作用を考慮していない Spencer-Attix 理論は質量阻止能比を多少小さく見積ることになるが<sup>5)</sup>、ここでは実効エネルギーの評価に与える影響は小さいと考えて無視した。

Table 2 に基準点で測定した電離電流  $I$ 、電離箱の減衰補正係数  $K_a$ 、再結合補正係数  $K_s$ 、質量阻止能比 ( $S_m/S_{\text{air}}$ )、および(4)式で与えられるグラフアイト壁に対する質量エネルギー吸収係数比  $a$  を示す。Fig. 8 に単一エネルギー光子の質量エネルギー吸収係数<sup>6)</sup>から得られた炭素に対するアルミニウムおよび銅の質量エネルギー吸収係数の比と光子エネルギーとの関係を示す。これを用いて実効エネルギーは Table 2 から得られるアルミニウムと銅についての  $a$  の値に対応する光子エネルギーとして求めた。その結果、実効エネルギーはアルミニウムおよび銅についてそれぞれ  $96\text{ keV}$ 、 $94\text{ keV}$  となった。

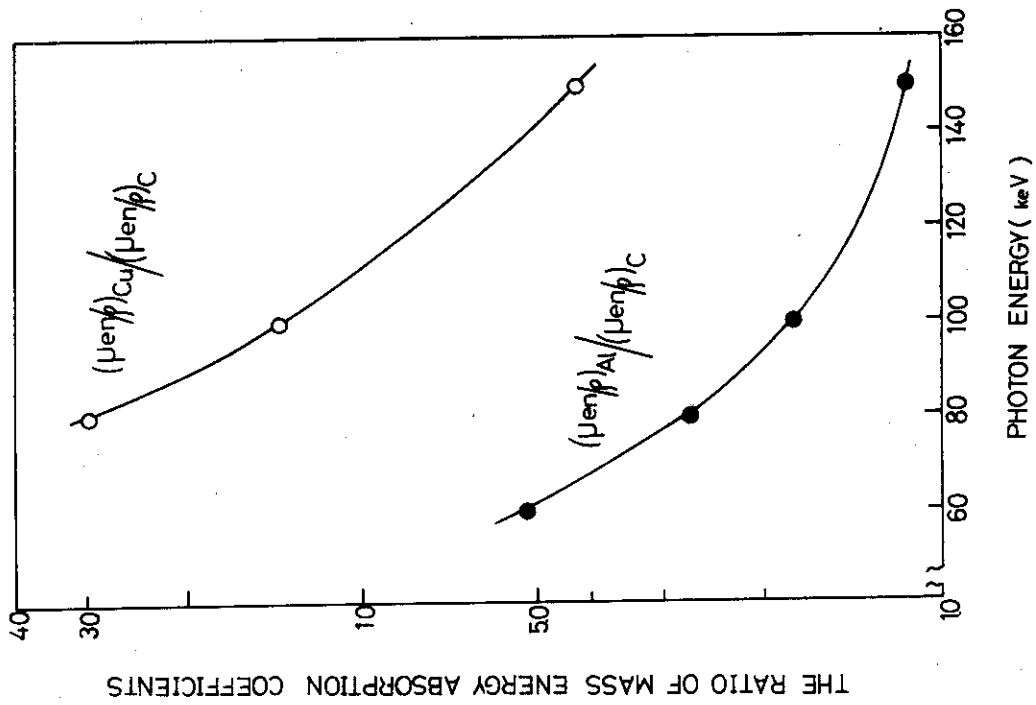


Fig. 8 The ratios of mass energy absorption coefficient of copper and aluminum to graphite as a function of photon energy.

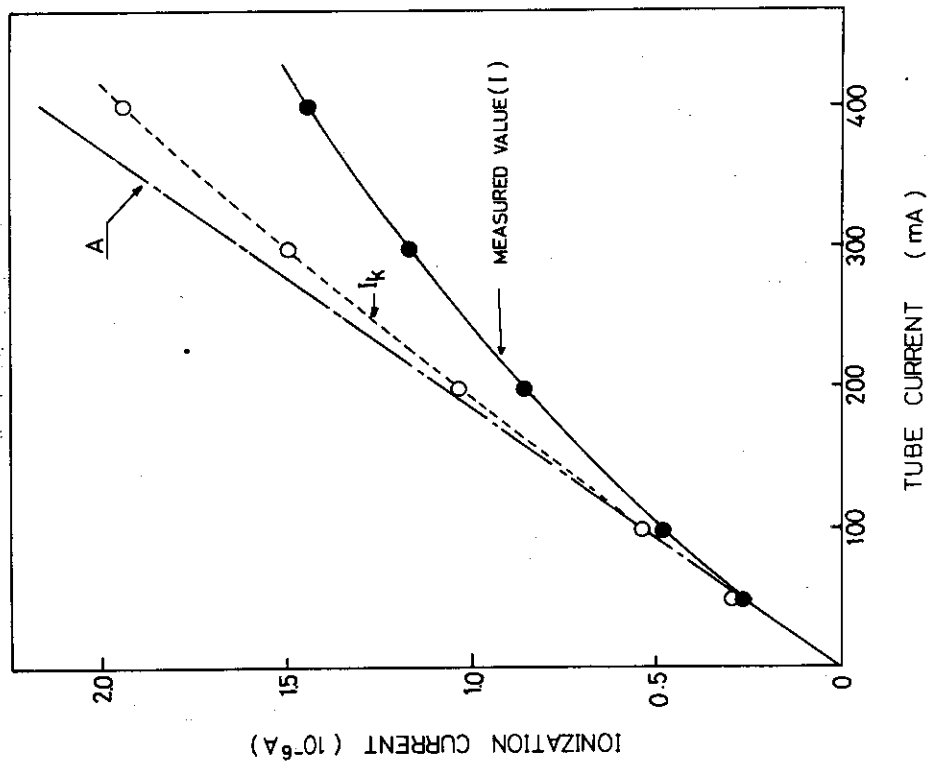


Fig. 7 Correction for the recombination loss of the cylindrical-cavity ionization chamber.

Table 2. Experimental results with cylindrical-cavity ionization chambers. a: relative dose rate.

Chamber	I (A)	$k_a$	$k_s$	$(\bar{S}_m/\bar{S}_{air})$	a
20 C	$1.67 \times 10^{-7}$	1.041	1.039	1.01	1.00
20 Al	$3.67 \times 10^{-7}$	1.027	1.086	0.86	1.95
20 Cu	$1.47 \times 10^{-6}$	1.71	1.49	0.73	15.50

### 3.4 エネルギースペクトルによる評価

NaI スペクトロメータを使用してX線のエネルギースペクトルを測定する場合、2 in  $\phi$   $\times$  2 in 1 結晶の使用によって200 kVp 以下ではNaI (T1) 結晶の検出効率ほとんど100%になり、観測されたスペクトルはX線のエネルギースペクトルにはほぼ一致すると考えられる。この場合、結晶端部からのコンプトン散逸を防ぐため結晶の中心軸にコリメートされたビームを垂直に入射させる必要がある。この方法は計数率の増大によるパイルアップを防ぐことにも役立つ。

X線のスペクトル $N(E)$ から実効エネルギーを求めるため、着目する被照射物の実効質量エネルギー吸収係数 $(\mu_{en}/\rho)_{ef}$ を(6)式によって計算した。

$$(\mu_{en}/\rho)_{ef} = \frac{\int_0^{E_{max}} N(E) \cdot \mu(E) \cdot E \cdot dE}{\int_0^{E_{max}} N(E) \cdot E \cdot dE} \quad (6)$$

ここで $N(E)$ はX線のエネルギースペクトル、 $\mu(E)$ は質量エネルギー吸収係数、 $E$ は光子のエネルギーである。

測定はプローブを鉛製のビームコリメータの中に挿入して行った。ビームコリメータは外径265 mm、長さ715 mmの円筒状で、プローブ挿入用のため67 mm  $\phi$  の空洞が設けられている。鉛の長さは約100 mmで400 kVp 以下のX線は完全に遮蔽できる。測定孔は1.5 mm  $\phi$  とし、ビームの中心がNaI 結晶の中心軸に入射するように調整した。ビームコリメータの入射角度は可変である。スペクトロメータには東芝400 ch 波高分析器EDS型を、シンチレータには2 in  $\phi$   $\times$  2 in 1 NaI (T1) を使用した。

Narrow beam geometry における光電吸収ピークに対応するエネルギーとパルス波高(channel number) の関係を $^{57}\text{Co}$  (122 keV)、 $^{241}\text{Am}$  (60 keV) および $^{137}\text{Cs}$  (32 keV - BaK-X) の $r$  標準線源を使用して測定し、エネルギー校正を行った。またこれらの $r$  線の光電吸収ピークからエネルギー分解能は $^{57}\text{Co}$ 、 $^{241}\text{Am}$  および $^{137}\text{Cs}$  の各 $r$  線エネルギーに対して、それぞれ16、19 および29% となった。ただし、 $^{57}\text{Co}$  の場合は122 keV (84.8%) のピークに136 keV (11.4%) が重なっているため、実際の分解能はこの値より小さいと考えられる。

光電吸収ピークをガウス分布と仮定し、さらに連続スペクトルのX線に対して観測されるスペクトルもガウス分布で近似できるとすれば、真のエネルギースペクトル曲線の半値巾 $W_1$ は、観



測されたピークの半値巾  $W_m$  から  $W_i = \sqrt{W_m^2 - W_0^2}$  によって求められる。ここで  $W_0$  は単一エネルギー  $\gamma$  線に対する光電吸収ピークの半値巾である。

測定は次のことを調べるために行った。

- (1) 管電圧 50 ~ 150 kV における X 線のスペクトル
- (2) ターゲットからの放射角度がスペクトルに与える影響および補強リムのスペクトルに与える影響
- (3) 銅フィルターを挿入したときのフィルターの厚さがスペクトルに与える影響

Fig. 10 は X 線発生装置の管電圧 50, 100, および 150 kV, 放射角度  $0^\circ$  におけるエネルギースペクトルの測定結果である。各スペクトルのピークは normalize されている。各スペクトルはガウス分布形に近い狭い分布曲線をもつ。これはターゲットから放出される連続スペクトル X 線のうち低エネルギー成分が主に 2 層の銅フィルター (厚さ計 1.4 mm) によって吸収されるためである。このため各スペクトルの強度は管電圧によって著しく異なる。

エネルギースペクトルのみに着目すると、管電圧が 50 ~ 100 kV の間では管電圧の増加とともにピークエネルギーが高エネルギー側に移動するが、100 ~ 150 kV の間ではピークの移動は少なく、高エネルギー側の裾が広がっていく傾向が見られる。

測定された各ピークの半値巾  $W_m$  から測定系の分解能を考慮して得られた半値巾  $W_i$  を用いて、 $W_i/W_m$  を求めると、50, 100, および 150 kV におけるピークに対してはそれぞれ 50, 92, および 96% となった。このことから 150 kV の場合、観測されたスペクトルは、ほぼ真の X 線スペクトルとほとんど変わっていないとみなせる。

Fig. 11 は管電圧 150 kV においてビームコリメータの入射角  $\theta$  を変えた場合のエネルギースペクトルの変化を示す。 $\theta = 0^\circ$  の場合、入射線は補強リム透過の影響を受けないが、 $\theta = 2^\circ$  および  $18.5^\circ$  では入射 X 線の中心線はリムを横切るため、その影響を受ける。

$\theta = 0^\circ \sim 18.5^\circ$  の間でリムの影響を受けない入射角における X 線スペクトルは  $\theta = 0^\circ$  におけるスペクトルとほぼ一致した。リムを透過する X 線のスペクトルはリムによって filtration を受けて高エネルギー側にずれる。

この filtration 効果は放射角度とともに増大し、 $\theta = 18.5^\circ$  では  $\theta = 0^\circ$  のスペクトルに対して、約 10 keV 移動した。またリムを透過した X 線強度は、どの入射角度でもリムを透過しない場合に比べて半減した。

Fig. 12 に測定ビーム中に銅フィルターを置き、その厚さを変えた時のスペクトルの変化を示す。銅の厚さが増すにともないピークエネルギーは、ほぼ直線的に増加しており、これから Fig. 11 において  $\theta = 18.5^\circ$  で入射するビームは  $\theta = 0^\circ$  で入射するビームが実効的に約 1 mm 厚の銅によって filtration を受けたものと等価であると考えることができる。銅の厚さを 3.9 mm まで増しても低エネルギー側の裾が依然として存在するが、これは NaI 結晶および遮光用アルミニウムカバーからの後方によるコンプトン散逸によるものと考えられる。

管電圧 150 kV において入射角度から  $\theta = 0^\circ$  および  $18.5^\circ$  に対して得られたスペクトルを用い、(6)式から銅の実効質量エネルギー吸収係数を算出した。この方法で得られた実効エネルギーは、 $0^\circ$  の場合 82 keV,  $18.5^\circ$  の場合 89 keV であった。

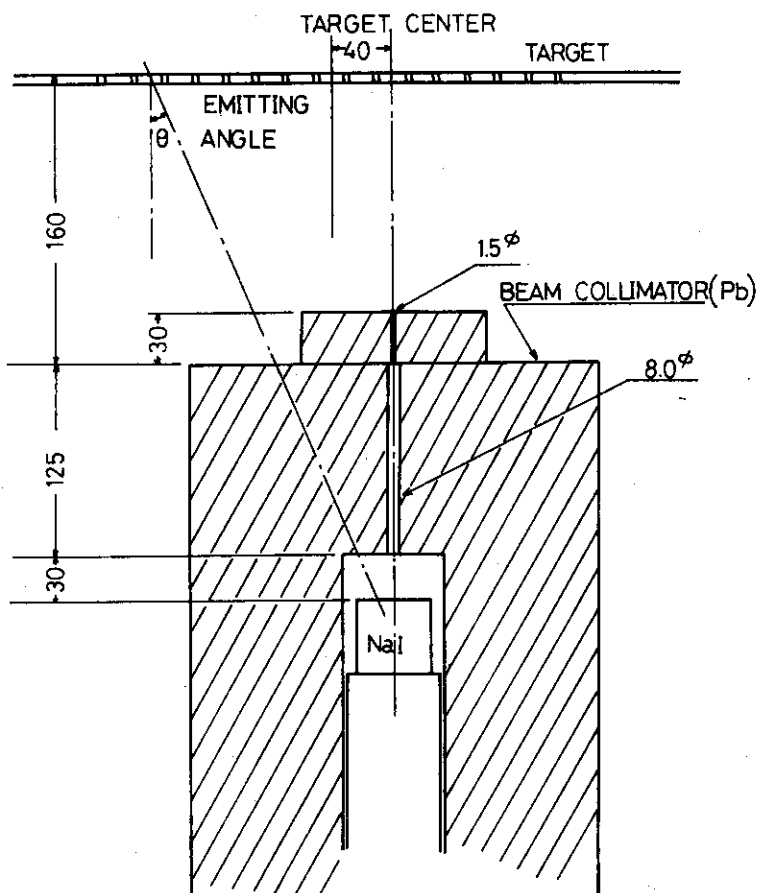


Fig. 9 Geometrical arrangement of X-ray spectrometry.

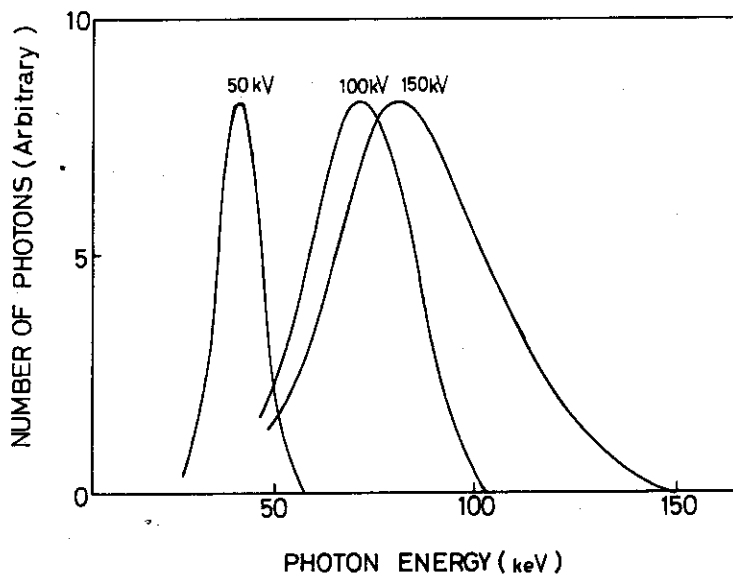


Fig. 10 Energy spectra at different tube voltages.

### 3.5 標準的なX線源との比較による推定

実効エネルギーが値付けされている標準的なX線源に対して、異った壁材の空洞電離箱間の電離電流比を種々の実効エネルギーに対して求めておけば、未知のX線に対しても同様に測定された電離電流比の比較からその実効エネルギーを推定できる。この方法は照射のジオメトリーやエネルギースペクトルの差異を考慮していないが、前三者の測定法から得られた値の目安になる。

標準的なX線源には電子技術総合研究所の中硬X線用の発生装置（島津製<sup>7)</sup>を使用した。この装置に対して値付けされている実効エネルギー（30～200 keV）とそれに対応する管電圧および使用したフィルターをTable 3 に示す。

測定に使用した電離箱は円筒型空洞電離箱（20型）で、壁材は3.3と同様グラファイト、アルミニウムおよび銅の3種類である。測定はX線の焦点から電離箱までの距離を130 cm、管電流を10 mA に保ち、管電圧を60 kV から180 kV まで変化させて行った。管電圧に対応する実効エネルギーの範囲は30～120 keV である。照射用X線発生装置による測定は3.3と同様な配置で管電流を100 mA とし、管電圧を100 kV から150 kV まで変えて行った。

この測定によって得られた実効エネルギーと各電離箱間の電離電流比をFig. 13 に示す。低原子番号の壁材に対する高原子番号の壁材の電離電流の比は、エネルギーが低下するにともなって増加する。一方、電離箱壁による強度減衰もエネルギーの低下とともに大きくなるが、これは高原子番号の壁材で著しい。両者の影響によって実効エネルギーに対する電離電流比はピークを持ち、このピークは $I_{Cu}/I_C$ の場合で最も鋭くなる。電離電流比 $I_{Cu}/I_{Al}$ の値は、実効エネルギーが100 keV 付近でエネルギーに対してほとんど変動しないため、これから実効エネルギーを推定するのは困難である。このため、電離電流比 $I_{Cu}/I_C$ および $I_{Al}/I_C$ の曲線に測定結果を比較、対応させて各管電圧に対する実効エネルギーを推定した。その結果をTable 4. に示す。

### 3.6 エネルギー測定結果の検討

各方法により管電圧150 kV に対して求められた実効エネルギーの値をTable 5 に示す。

Narrow beam geometry での測定は銅の半価層法とエネルギースペクトル法に対して行ったが、これらから求めた実効エネルギーは87 keV（半価層法）、82～89 keV（スペクトル法）であり、いずれもbroad beam geometry における電離箱で得た値よりも低い。

本装置のターゲットは大きな面積をもつばかりでなく、補強リムを含んだ複雑な構造をもっている。このようなターゲットから放射されるX線は、照射のジオメトリーの効果によってエネルギースペクトルが影響を受け、実効エネルギーは測定条件により異ってくる。特に、narrow beam geometry で得られた測定値は実際の照射条件に対応する実効エネルギー値よりも多少低くなる。これは、相対的に高エネルギー成分を多量に含む大角度の放射X線が、ビームコリメータによって除去されるためと考えられる。

また、半価層法とスペクトル法で求めた実効エネルギーの値を比較すると、放射角度 $\theta=0^\circ$ において半価層法で求めた値の方が高い。この差異は両方法の原理的な相違も考慮する必要もあるが、コリメータの内径の違いによる影響も考えられる。すなわち半価層を測定する際の内径は30mm

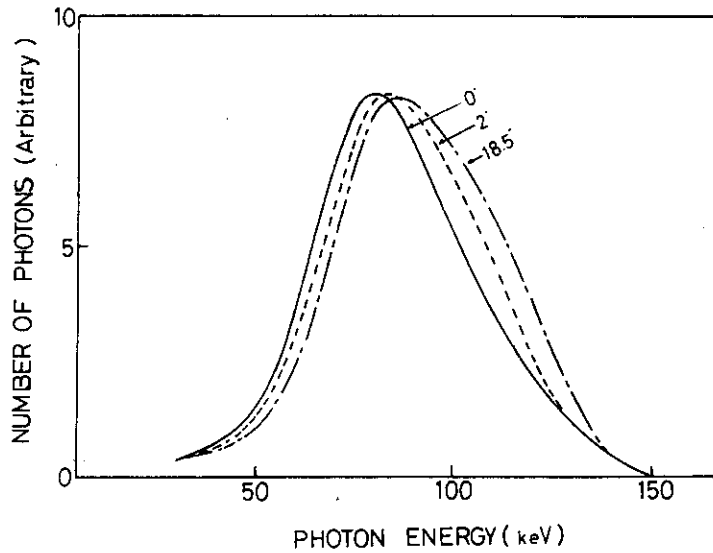


Fig. 11 Energy spectra for various emitting angles of X-rays at 150kVp.

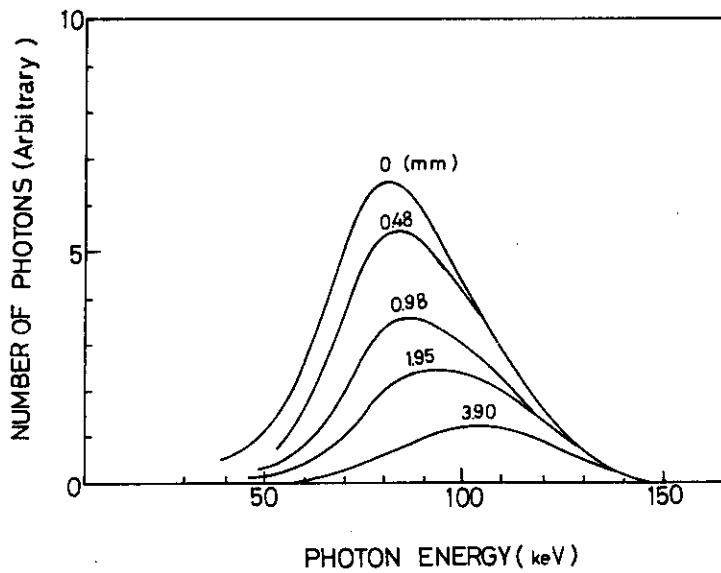


Fig. 12 Energy spectra for various thicknesses of the filter (Cu).

Table 3. The relation between effective energy and tube voltage of ETL X-ray generator.

Effective energy (keV)	Tube voltage (kV)	Filter (mm)
30	60	2.32 (Al)
50	100	0.26 (Cu)+1.01 (Al)
80	120	1.30 (Cu)+1.01 (Al)
120	180	4.69 (Cu)+1.01 (Al)

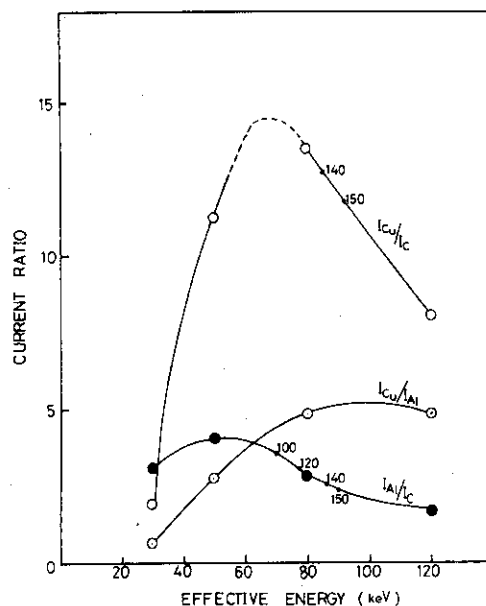


Fig. 13 Ionization current ratios between various walls as a function of the effective energy.

Table 4. Effective energy estimated from the ionization current ratios.

Tube voltage (kV)	Current ratio		Effective energy (keV)	
	$I_{Cu}/I_C$	$I_{Al}/I_C$	(a)	(b)
100	15.1	3.54	-	70
120	14.5	3.00	-	78
140	12.8	2.54	85	86
150	11.8	2.36	92	90

(a); obtained from the current ratio ( $I_{Cu}/I_C$ )

(b); obtained from the current ratio ( $I_{Al}/I_C$ )

Table 5. Effective energy evaluated by different methods for tube voltage of 150kVp.

Method	Beam geometry	Effective energy (keV)
HVL in Cu	Narrow (30mm $\phi$ )	87
	Broad	90
Cavity chamber	Broad	94 ( $I_{Al}/I_C$ )
		95 96 ( $I_{Cu}/I_C$ )
Spectrometry	Narrow (1.5mm $\phi$ )	82 ( $\theta=0^\circ$ )
		89 ( $\theta=18.5^\circ$ )
Comparison with ETL X-ray generator	Broad	90 ( $I_{Al}/I_C$ )
		91 92 ( $I_{Cu}/I_C$ )

$\phi$ であるため、銅板に入射するビーム中にはリムを通過した硬X線も含まれているが、一方NaI結晶によるスペクトル測定ではコリメータの内径が1.5 mm  $\phi$ であるため、リムを透過したX線はほとんど入射しないものと思われる。

放射角度  $\theta = 18.5^\circ$  でリムを通過するX線の実効エネルギーは89 keVとなり、 $\theta = 0^\circ$ の値より7 keV 高くなる。 $\theta = 18.5^\circ$ 以上の放射X線に対しては、実効エネルギーはさらに大きくなるものと考えられる。ターゲット端部から基準点への放射角度は約  $60^\circ$ であり、またターゲット全面から基準点への平均放射角度が約  $40^\circ$ になることを考慮すると、基準点における実効エネルギーは89 keV以上に達するものと考えられる。電離箱法による実効エネルギーが他法より高めなのはこうした理由によるものと思われる。エネルギーもそれに応じて多少変ると考えられるが、実際の照射は、一般にターゲット面から10～20 cm下方の位置で行なわれるので、この範囲における実効エネルギーの変化は小さいと考えられる。

Broad beam geometryにおける半価層では斜入射による pass length の増加とビルドアップ効果が互いに打ち消し合う方向に作用するが、両者の寄与の評価は困難である。したがって、この方法で求めた実効エネルギーは信頼性に欠ける。

異った壁材の空洞電離箱で得られた吸収線量あるいは吸収線量率の比から実効エネルギーを求める方法は、平均質量阻止能比、壁に対する強度補正係数、イオンの再結合補正係数などの決定に係わる誤差はあるが、実際の照射条件によく適合した実効エネルギーを与える。この方法で得た実効エネルギー 95 keV は、電総研の標準X線源との比較で求めた値 91 keV と比較的よく一致している。

以上の点を総合して、管電圧 150 kV の場合、基準点における実効エネルギーは電離箱法で求めた値 95 keV を採用した。

## 4. 基準点における照射線量率の測定

X線の照射線量率分布を求めるため、まず基準点における照射線量率を平行平板型電離箱で測定した。また、電離箱測定の信頼性を確認するために、フリッケ線量計による吸収線量の測定を行い、これから照射線量率を算出した。平行平板型電離箱は $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対して、高崎研における標準として使用されており、またフリッケ線量計もこの電離箱測定との比較で、よい一致が確かめられている<sup>8)</sup>。

### 4.1 平行平板型電離箱による測定

測定に使用した電離箱は、グラフアイト壁の平行平板型電離箱 (CH-5)<sup>3)</sup>で電離容積は 0.323 ml である。

CH-5の電離電流  $I$  (A) から照射線量率  $\dot{X}$  (R/h) は(7)式で与えられる。

$\phi$ であるため、銅板に入射するビーム中にはリムを通過した硬X線も含まれているが、一方NaI結晶によるスペクトル測定ではコリメータの内径が1.5 mm  $\phi$ であるため、リムを透過したX線はほとんど入射しないものと思われる。

放射角度  $\theta = 18.5^\circ$  でリムを通過するX線の実効エネルギーは89 keVとなり、 $\theta = 0^\circ$ の値より7 keV 高くなる。 $\theta = 18.5^\circ$ 以上の放射X線に対しては、実効エネルギーはさらに大きくなるものと考えられる。ターゲット端部から基準点への放射角度は約  $60^\circ$ であり、またターゲット全面から基準点への平均放射角度が約  $40^\circ$ になることを考慮すると、基準点における実効エネルギーは89 keV以上に達するものと考えられる。電離箱法による実効エネルギーが他法より高めなのはこうした理由によるものと思われる。エネルギーもそれに応じて多少変ると考えられるが、実際の照射は、一般にターゲット面から10~20 cm下方の位置で行なわれるので、この範囲における実効エネルギーの変化は小さいと考えられる。

Broad beam geometryにおける半価層では斜入射による pass length の増加とビルドアップ効果が互いに打ち消し合う方向に作用するが、両者の寄与の評価は困難である。したがって、この方法で求めた実効エネルギーは信頼性に欠ける。

異った壁材の空洞電離箱で得られた吸収線量あるいは吸収線量率の比から実効エネルギーを求める方法は、平均質量阻止能比、壁に対する強度補正係数、イオンの再結合補正係数などの決定に係わる誤差はあるが、実際の照射条件によく適合した実効エネルギーを与える。この方法で得た実効エネルギー 95 keV は、電総研の標準X線源との比較で求めた値 91 keV と比較的よく一致している。

以上の点を総合して、管電圧 150 kV の場合、基準点における実効エネルギーは電離箱法で求めた値 95 keV を採用した。

## 4. 基準点における照射線量率の測定

X線の照射線量率分布を求めるため、まず基準点における照射線量率を平行平板型電離箱で測定した。また、電離箱測定の信頼性を確認するために、フリッケ線量計による吸収線量の測定を行い、これから照射線量率を算出した。平行平板型電離箱は  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対して、高崎研における標準として使用されており、またフリッケ線量計もこの電離箱測定との比較で、よい一致が確かめられている<sup>8)</sup>。

### 4.1 平行平板型電離箱による測定

測定に使用した電離箱は、グラフアイト壁の平行平板型電離箱 (CH-5)<sup>3)</sup>で電離容積は 0.323 ml である。

CH-5の電離電流  $I$  (A) から照射線量率  $\dot{X}$  (R/h) は(7)式で与えられる。

$$\dot{X} = 1.08 \times 10^{13} \cdot \frac{I}{V} \cdot \frac{273+T}{273} \cdot \frac{760}{P} \left( \frac{S_c}{S_{air}} \right) \frac{(\mu_{en}/\rho)_{air}}{(\mu_{en}/\rho)_c} \cdot K_a \cdot K_s \quad (7)$$

ここで、 $v$  は電離容積 (ml),  $T$  は気温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $P$  は気圧 (mmHg),  $(S_c/S_{air})$  はグラフアイトの空気に対する2次電子の質量阻止能比,  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ ,  $(\mu_{en}/\rho)_c$  はそれぞれ空気とグラフアイトの質量エネルギー吸収係数,  $K_a$  は電離箱壁による強度減衰に対する補正係数,  $K_s$  はイオン再結合に対する補正係数である。

CH-5 は電極間隙が1 mmであるため、印加電圧150 Vでは $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対して $3 \times 10^8$  R/hでも電離電流は完全に飽和に達するので、今回の測定においても $K_s = 1.0$ とした。 $K_a$  は高圧電極側の壁の厚さを変えて電離電流を測定し、壁の厚さを0に外挿する方法で実験的に求めた。Fig. 14に示す外挿の結果、 $K_a = 1.055$ となった。

#### 4.2 フリッケ線量計による測定

測定に用いたフリッケ線量計溶液には $\text{Fe}^{2+}$ 濃度 $5 \times 10^{-3}$  M, NaCl濃度 $10^{-3}$  Mの酸素飽和した0.8 N硫酸酸性水溶液(0.4 M)を用いた。照射容器には内径12 mm  $\phi$ , 肉厚1.5 mmのパイレックスガラス製試験管(溶液部分の高さ約60 mm)を使用した。照射試験は照射線量率分布の影響が最少になるようにターゲットの長軸と平行に2本同時に並べてセットし、10分間と20分間の照射をそれぞれ2回づつ行った。吸光度測定には島津UV-210 A型分光光度計を使用した。

溶液の吸光度変化量 $\Delta OD$ から照射線量率 $X$  (R/h)は(8)式で求められる<sup>9)</sup>。

$$X = 0.965 \times 10^9 \cdot \frac{\Delta OD}{\epsilon \cdot d \cdot \rho \cdot G \cdot t} \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_{air}}{(\mu_{en}/\rho)_f} \cdot K_b \quad (8)$$

ここで、 $\epsilon$  は分子吸光係数,  $\rho$  はフリッケ溶液の密度 ( $1.025 \text{ g/cm}^3$ ),  $d$  は分光光度計の吸収セル中の光路長 (1.0 cm),  $G$  は $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ のG値,  $t$  は照射時間(h),  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ ,  $(\mu_{en}/\rho)_f$  はそれぞれ空気とフリッケ溶液の質量エネルギー吸収係数,  $K_a$  はガラス壁と溶液中での強度減衰に対する補正係数である。

分子吸光係数には $2205 \text{ l/mol} \cdot \text{cm}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ), 温度係数には $+7\%/^{\circ}\text{C}$ を使用した<sup>9)</sup>。G値はX線の実効エネルギーが95 keVと評価されたので、G値のエネルギー依存性<sup>10)</sup>から14.7を使用した。強度減衰に対する補正係数 $K_b$ は電離箱測定における $K_a$ および $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線で実験的に得られている値から次のようにして求められた。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対する $K_a$ は実験値として1.015が与えられている。一方 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対する $K_b$ は照射容器のガラス管の厚さや管の内径を変えて測定した結果、1.030となり $K_a$ と $K_b$ の間には $K_b - 1 = 2(K_a - 1)$ なる関係があること、すなわちフリッケ線量計の照射容器の方が強度減衰量の2倍であることがわかった。グラフアイトに対する水およびガラスの質量減衰係数の比率0.1~1.5 MeVのエネルギー領域ではほぼ一定とみなせるので、150 kVpのX線に対しても上部の関係式は成立つと考えられる。したがって、4.1で求められた $K_a = 1.055$ を用いて $K_b = 1.11$ が得られた。



## 4.3 測定結果

管電圧 150 kV, 管電流 400 mA の照射条件で平行平板型電離箱とフリッケ線量計により測定した基準点における照射線量率をそれぞれ Table 6, 7 に示す。両者の値は 2% 以内でよく一致しており, いずれの方法も, 本装の X 線に対する吸収線量測定の基準として十分使用し得ることが確かめられた。

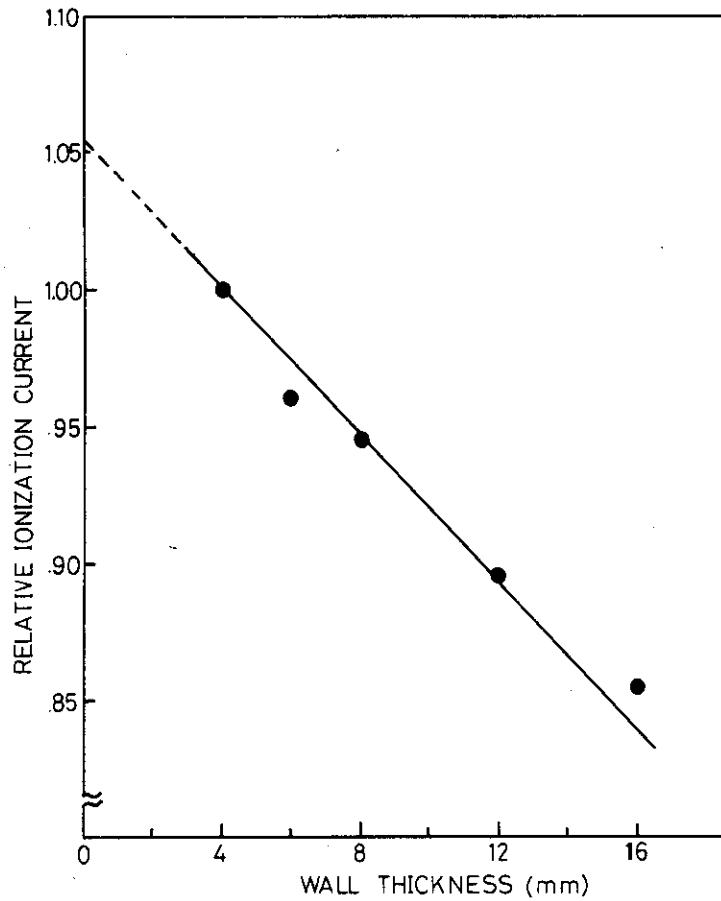


Fig. 14 Correction for the thickness of the graphite wall of the parallel-plate ionization chamber.

Table 6. Exposure rate at the reference point measured with the parallel-plate ionization chamber.

I (A)	$K_a$	$K_s$	$(\frac{S_m}{S_{air}})$	X (R/h)
$7.50 \cdot 10^{-9}$	1.055	1.00	1.10	$3.27 \cdot 10^5$

Table 7. Exposure rate at the reference point measured with Fricke dosimeter.

Sample number	Irradiation time (min)	$Fe^{3+}$ yield (mol/l)	Exposure rate (R/h)
1	10	0.740	$3.27 \times 10^5$
2	10	0.733	$3.26 \times 10^5$
3	20	1.441	$3.18 \times 10^5$
4	20	1.434	$3.16 \times 10^5$
Average			$3.22 \times 10^5$

## 5. 深部線量分布

厚い被照射体中の吸収線量分布を求めるには、被照射物質と等価な線量計を試料中に埋め込んで測定するのが望ましいが、被照射試料と等価な線量計が得にくいことや線量計を埋め込むのが困難なため、標準的な被照射物質中で測定した百分率深部線量分布によって代表する方法がとられる。

今回はポリメチルメタクリレート (PMMA)、アルミニウムおよび銅媒質中での深部線量分布をPMMA線量計とCTA線量計を用いて測定した<sup>11)</sup>。PMMA線量計による測定は厚さ1mmのPMMA板を9枚積層した10×9.7×8.9cmのブロックの中心にPMMA線量計を埋め込んで行った。アルミニウムと銅に関しては、これと等価な固体線量計がないため、CTA線量計(厚さ125μ)をアルミニウム板または銅板の間に挿入して照射した。この場合CTAフィルムはアルミニウムまたは銅の中での固体cavityに相当するが、フィルムの厚さは、Bragg-Grayの空洞原理を適用するには大き過ぎる。一方、cavity sizeの影響を考慮したBurlinの一般理論<sup>5)</sup>の適用もこの程度の低エネルギーに対しては困難である。しかし、フィルムの挿入によって媒質中のX線場はほとんど乱されないので、深部方向についてエネルギースペクトルが変化しないと仮定すれば、CTA線量計の読みから得られた分布はアルミニウムまたは銅媒質中の相対的な深部線量分布を与えるものと考えられる。

アルミニウムおよび銅の積層体の大きさはそれぞれ6×9×5.1(厚さ)cmおよび6×9×1.3(厚さ)cmである。照射はこれらの試料の上面をターゲットの中心から5cm下方(基準点より5cm上方)の位置にセットして、管電圧150kV、管電流400mAの照射条件で行った。

Fig. 15はPMMA、アルミニウムおよび銅媒質中での百分率深部線量分布である。50%の線量を与える深さはPMMA、アルミニウム、銅に対してそれぞれ5.7, 4.1, 1.6g/cm<sup>2</sup>であった。

この深部線量分布は、試料に対するX線の入射角度分布およびスペクトルが同一であれば、そのまま適用できる。しかし、厳密には入射角度分布とスペクトルは本装置の場合、試料の置かれる位置によって異なるため、深部線量分布も照射位置によって多少変化すると考えられるが、ここではこの影響を一応無視した。

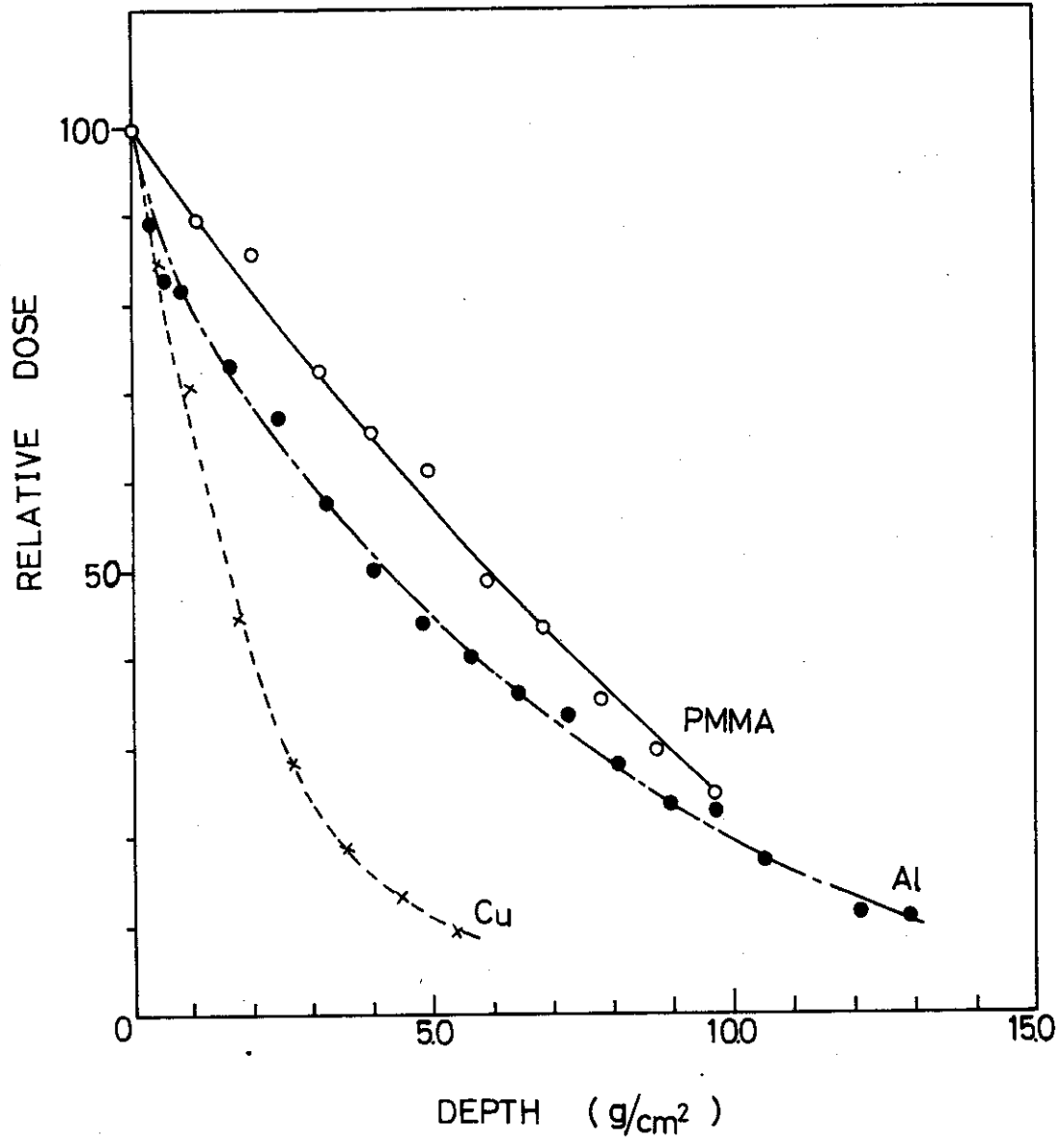


Fig. 15 Depth dose distributions in the various materials at 150kVp.

## 6. 後方散乱の影響

100 ~ 200 kVp のX線照射では、試料自身および試料の後方の物質からの散乱が、吸収線量分布に対して大きな影響を与える。十分厚い試料の照射では、試料表面の照射線量率  $X_s$  は、試料自体の後方散乱のために試料がそこがない場合の同じ位置の照射線量率  $X_0$  よりも大きくなる。両者の比  $X_s / X_0$  は後方散乱係数  $B_L$  として定義される。

グラファイト壁の円筒型電離箱 (20C) を用いて  $B_L$  を実測した結果を Fig. 16 に示す。測定は基準点にセットした電離箱の真下に PMMA, アルミニウムおよび銅の各散乱媒質 (大きき 60 cm × 40 cm) を近接して置くことにより行われた。散乱媒質の厚さが増すにともなって、 $B_L$  は飽和して行く。PMMA の場合、 $B_L$  は約  $5 \text{ g/cm}^2$  の厚さで飽和に達し、飽和後方散乱係数  $B_{Ls}$  は 1.22 となった。アルミニウムおよび銅の場合飽和に達する厚さは、それぞれ約  $2 \text{ g/cm}^2$ ,  $1 \text{ g/cm}^2$  であり、 $B_{Ls}$  はそれぞれ 1.11, 1.03 となった。 $B_{Ls}$  は原子番号の低い物質ほど大きくなる。これは散乱光子は媒質中で多数回のコンプトン散乱を繰り返した結果放出されるが、その過程で光電効果により吸収される割合が低原子番号の媒質ほど少ないためと考えられる。

基準点の照射線量率の測定においても後方散乱の影響が問題になるが、下方のコンベア (ステンレス製) による影響は、基準点とコンベア間の距離やコンベア自体の原子番号を考慮すると、ほとんど無視できると考えられる。

## 7. 照射線量率分布

基準点の照射線量率は、平行平板型電離箱とフリッケ線量計を用いて与えることができたが、実際に、ある大きさを有する試料を照射する場合は、ターゲット面下方の空間における照射線量率分布が必要である。このため、(1) ターゲット面に垂直な中心軸上における高さ方向の線量率分布、(2) ターゲット面と平行な照射面内での照射線量率分布を測定した。

### 7.1 高さ方向の分布

ターゲット中心軸上における高さ方向の相対照射線量率分布を Fig. 17 に示す。線量率の測定は小さなプローブを有するシリコン固体電離箱 (SIC)<sup>12)</sup> で行った。基準点の線量率は 1.0 に normalize した。ターゲット面からの距離 3 ~ 20 cm の範囲では、距離と線量率の関係はほぼ直線的である。この測定において SIC プローブは感受部がシリコンであるため、100 keV 程度の低エネルギーではかなりのエネルギー依存性があるが、X線の実効エネルギーはターゲットからの距離によって、変化しないものと仮定した。

## 6. 後方散乱の影響

100 ~ 200 kVp のX線照射では、試料自身および試料の後方の物質からの散乱が、吸収線量分布に対して大きな影響を与える。十分厚い試料の照射では、試料表面の照射線量率  $X_s$  は、試料自体の後方散乱のために試料がそこがない場合の同じ位置の照射線量率  $X_0$  よりも大きくなる。両者の比  $X_s / X_0$  は後方散乱係数  $B_L$  として定義される。

グラファイト壁の円筒型電離箱 (20C) を用いて  $B_L$  を実測した結果を Fig. 16 に示す。測定は基準点にセットした電離箱の真下に PMMA, アルミニウムおよび銅の各散乱媒質 (大きさ  $60 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ ) を近接して置くことにより行われた。散乱媒質の厚さが増すにともなって、 $B_L$  は飽和して行く。PMMAの場合、 $B_L$  は約  $5 \text{ g/cm}^2$  の厚さで飽和に達し、飽和後方散乱係数  $B_{Ls}$  は 1.22 となった。アルミニウムおよび銅の場合飽和に達する厚さは、それぞれ約  $2 \text{ g/cm}^2$ ,  $1 \text{ g/cm}^2$  であり、 $B_{Ls}$  はそれぞれ 1.11, 1.03 となった。 $B_{Ls}$  は原子番号の低い物質ほど大きくなる。これは散乱光子は媒質中で多数回のコンプトン散乱を繰り返した結果放出されるが、その過程で光電効果により吸収される割合が低原子番号の媒質ほど少ないためと考えられる。

基準点の照射線量率の測定においても後方散乱の影響が問題になるが、下方のコンベア (ステンレス製) による影響は、基準点とコンベア間の距離やコンベア自体の原子番号を考慮すると、ほとんど無視できると考えられる。

## 7. 照射線量率分布

基準点の照射線量率は、平行平板型電離箱とフリッケ線量計を用いて与えることができたが、実際に、ある大きさを有する試料を照射する場合は、ターゲット面下方の空間における照射線量率分布が必要である。このため、(1) ターゲット面に垂直な中心軸上における高さ方向の線量率分布、(2) ターゲット面と平行な照射面内での照射線量率分布を測定した。

### 7.1 高さ方向の分布

ターゲット中心軸上における高さ方向の相対照射線量率分布を Fig. 17 に示す。線量率の測定は小さなプローブを有するシリコン固体電離箱 (SIC)<sup>12)</sup> で行った。基準点の線量率は 1.0 に normalize した。ターゲット面からの距離 3 ~ 20 cm の範囲では、距離と線量率の関係はほぼ直線的である。この測定において SIC プローブは感受部がシリコンであるため、100 keV 程度の低エネルギーではかなりのエネルギー依存性があるが、X線の実効エネルギーはターゲットからの距離によって、変化しないものと仮定した。

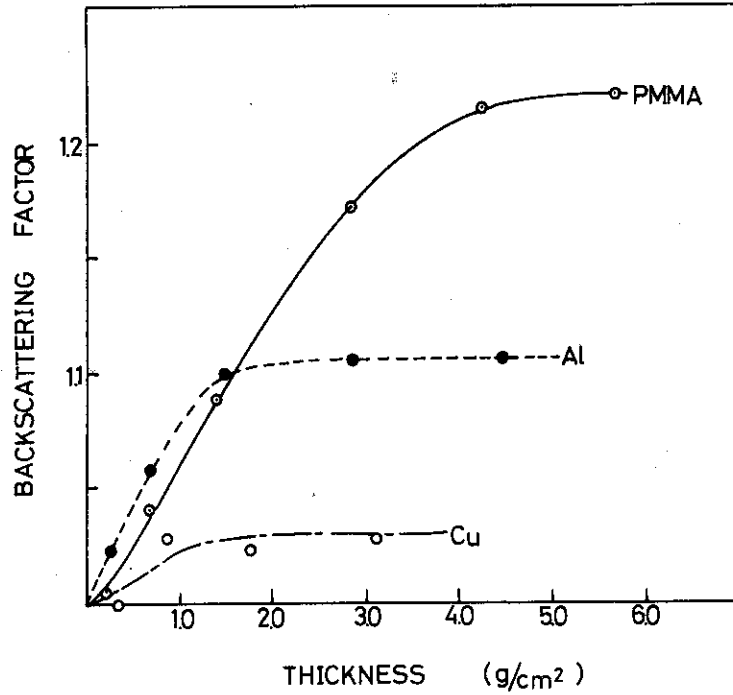


Fig. 16 Backscattering factors with increase of the sample thickness.

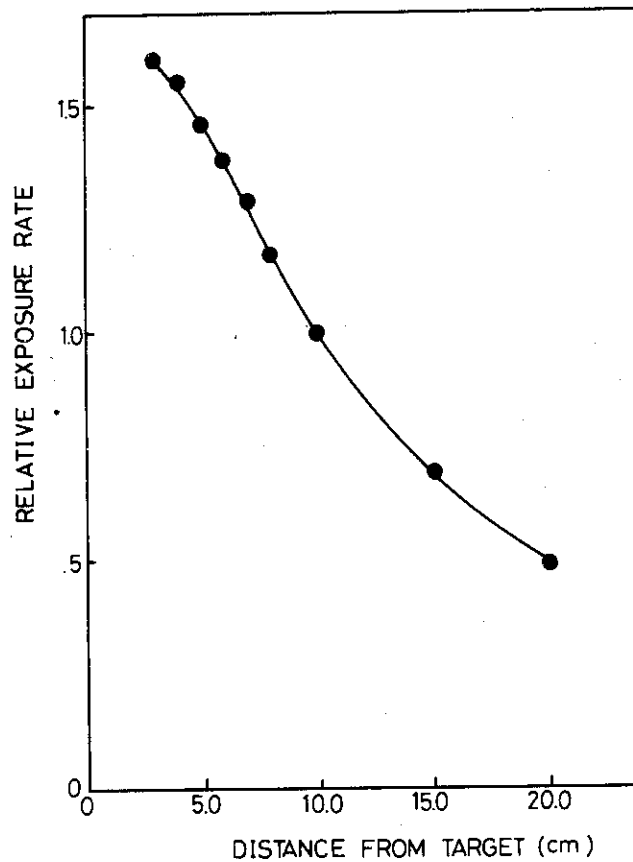


Fig. 17 Exposure rate as a function of distance from target.

## 7.2 照射面内の分布

照射面内の照射線量率分布の測定には、線量率計よりも積分型の固体線量計が適している。本測定ではPMMA線量計を用いて、ターゲット面からの距離が、それぞれ5 cm, 10 cm, 20 cmにおける照射面内の照射線量率分布を測定した。照射野の寸法は30 × 45 cmとし、PMMA線量計をターゲットの縦方向および横方向に、それぞれ5 cm, 2.5 cmの間隔で計117枚セットした。

Fig. 18の(a), (b), (c)に測定結果を示す。10 × 20 cmの大きさの試料を照射する場合を考えると、ターゲット面からの距離が5 cmの場合は線量率の均一度 ( $X_{\max}/X_{\min}$ ) 1.59であるが、ターゲットからの距離が20 cmの場合は、均一度は1.36となり、分布はかなり平坦になる。



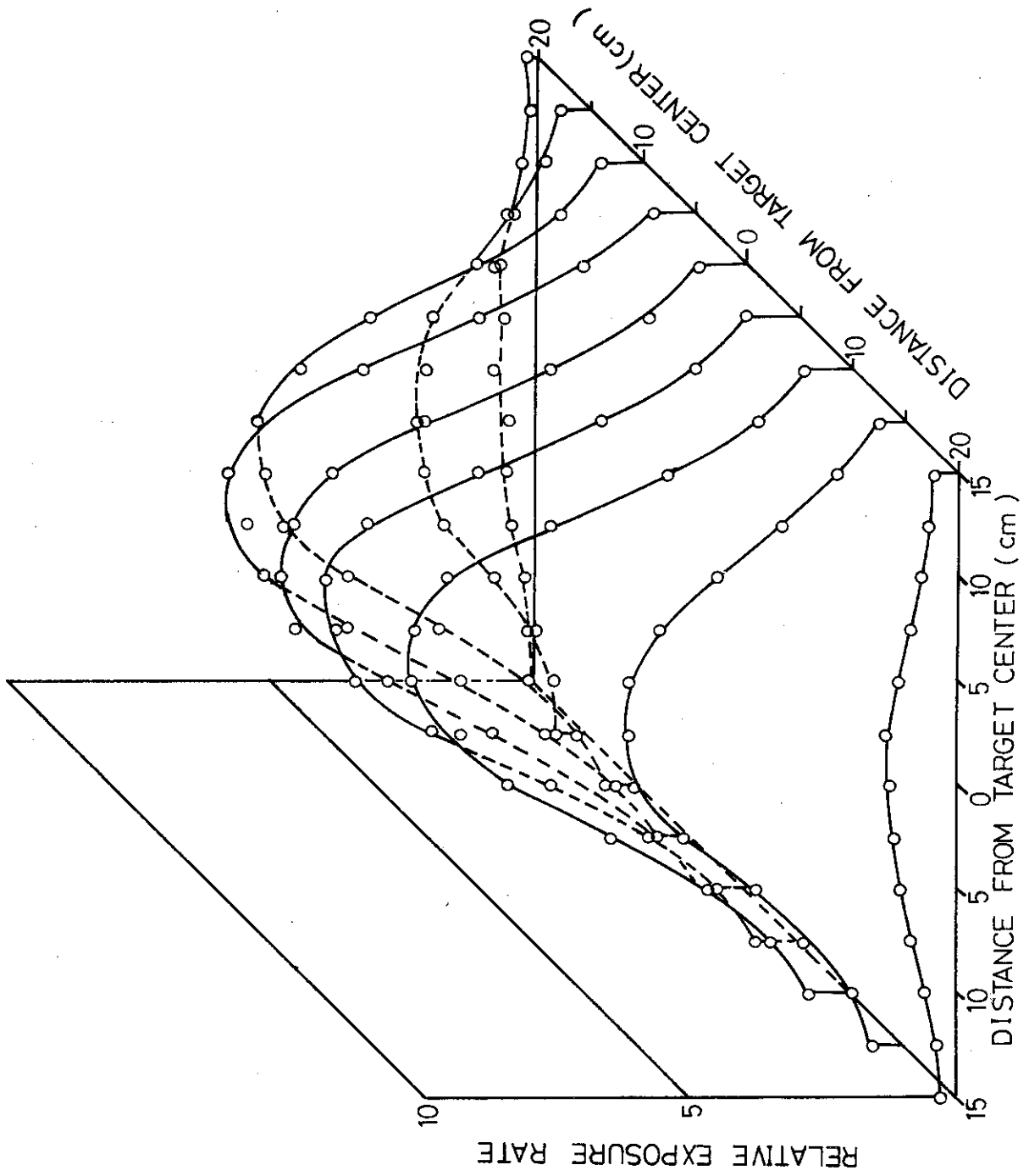


Fig. 18(a) Exposure rate distribution in the irradiation area.  
Distance from target, 5cm

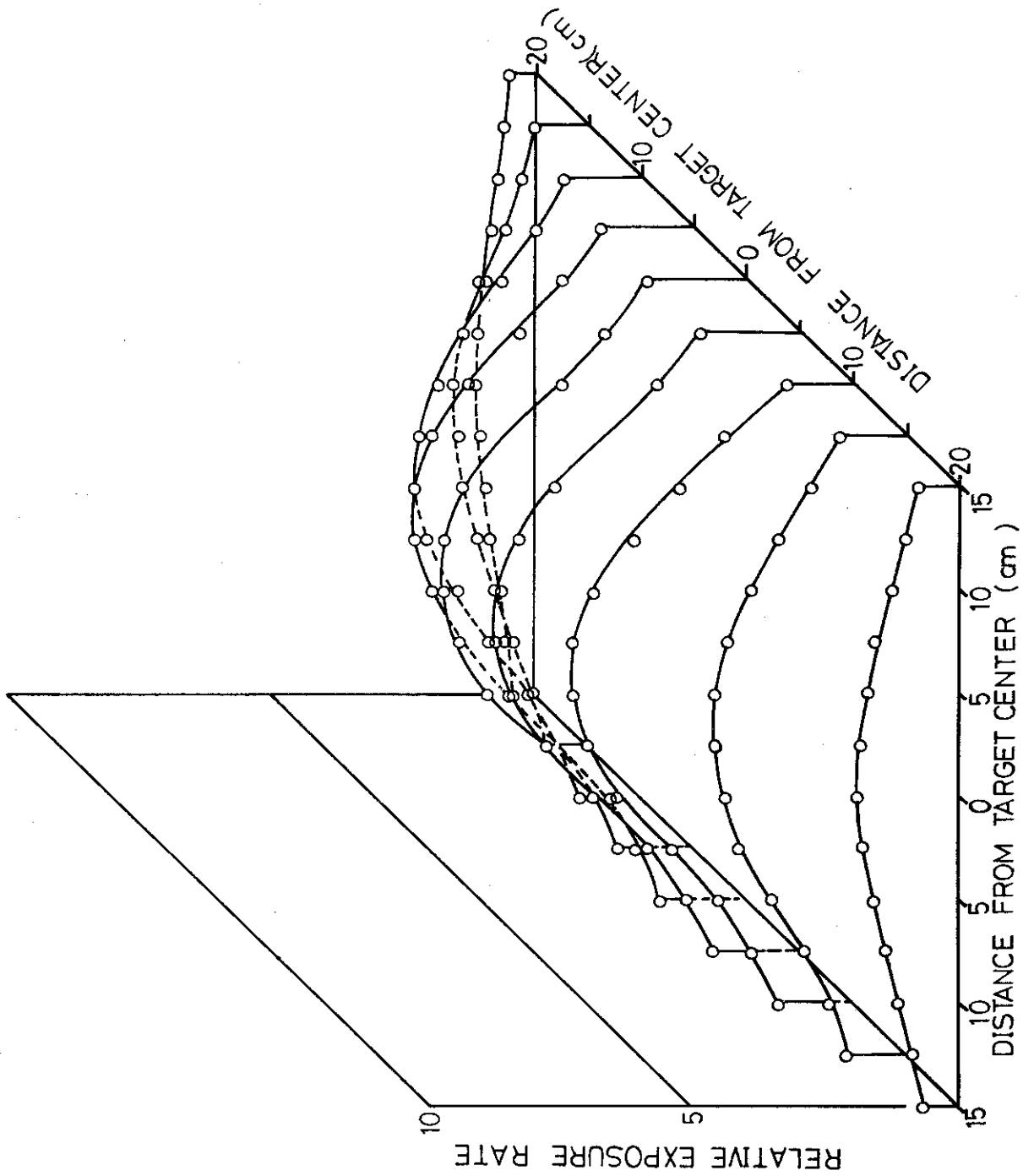


Fig. 18(b) Exposure rate distribution in the irradiation area.  
Distance from target, 10cm

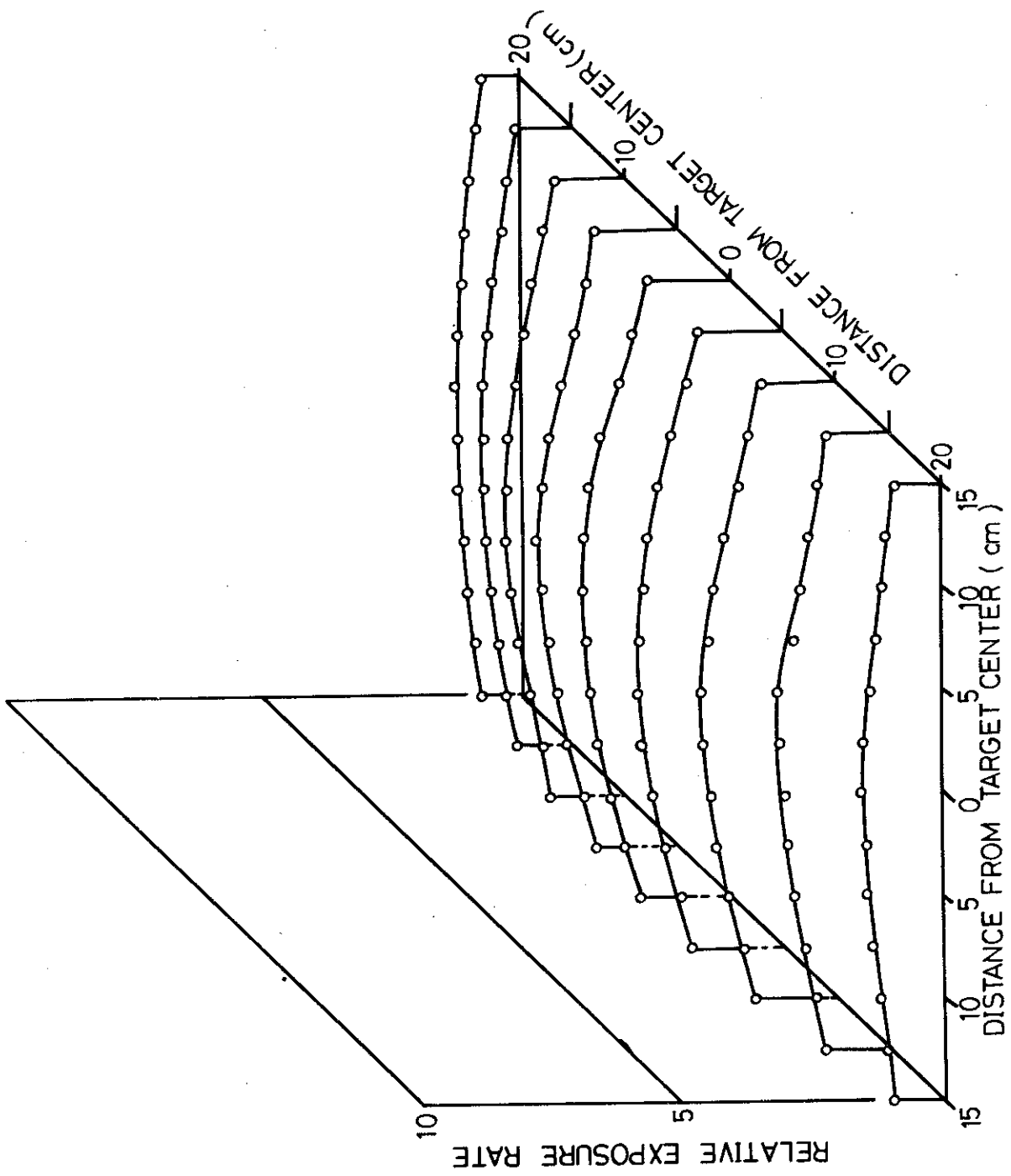


Fig. 18(c) Exposure rate distribution in the irradiation area.  
Distance from target, 20cm

## 8. 線量算出法

大出力X線発生装置の吸収線量算出に必要な実効エネルギーを評価するため、種々の方法による測定を行った。その結果、管電圧 150 kV、管電流 400 mA の出力条件において実効エネルギーは 95 keV と評価された。また、基準点における照射線量率は  $3.27 \times 10^5$  R/h となった。

これらの結果をもとにして、一定の大きさと厚さを有する被照射体の吸収線量分布を算出する方法が見出された。

実際の照射における被照射体中の吸収線量は次の手順で求められる。

被照射体が置かれていた場所の空間の照射線量率が既知で、かつ被照射体の寸法が照射線量率分布や後方散乱を無視できる程度に小さければ、その吸収線量  $D$  は(9)式で与えられる。

$$D = 0.869 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \cdot \dot{X} \cdot t = f_c \cdot \dot{X} \cdot t \quad (9)$$

ここで、 $f_c$  はラド変換係数 ( $= 0.869 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$ )、 $\dot{X}$  は照射線量率 (R/h)、 $t$  は照射時間 (h) である。

被照射体が照射線量率分布を無視できない程度の寸法でかつ、 $1 \text{ g/cm}^2$  程度以上の厚さを持つ場合は、平面の照射線量率分布、深部線量分布、および後方散乱による効果を考慮しなければならない。この場合、被照射体全体の平均吸収線量  $D_m$  は(10)式で与えられる。

$$D_m = f_c \cdot X \cdot t \cdot f_p \cdot f_d \cdot B_{Ls} \quad (10)$$

ここで、 $X$  はターゲット中心軸上で被照射体表面の位置 (但し被照射体は存在しない) における照射線量率、 $f_p$  は照射面内の照射線量率分布を平均化するための係数 ( $f_p < 1$ ) でターゲットから被照射体表面までの距離と被照射体の形状、大きさで決まる。

$f_d$  は深部線量分布を平均化するための係数 ( $f_d < 1$ ) で物質の種類とその厚さによって決まる。

$B_{Ls}$  は飽和後方散乱係数であり、物質によって決まる。厳密には深部線量分布はターゲットからの距離に依存し、また  $B_L$  は被照射体の大きさ (面積) に依存するが、ここではこれらの効果を無視した。被照射体の吸収線量に関する均一度  $\alpha$  ( $D_{max}/D_{min}$ ) は、平面の照射線量率分布の均一度  $\alpha_p$  と深部線量分布の均一度  $\alpha_d$  との積で近似できる。

以上の諸係数を次のような照射条件下で求めた。

- (1) 被照射体の形状を板状とする。
- (2) 後方散乱が飽和に達する厚さより薄い被照射物質に対しては、その後方に被照射物質と等価な物質を置き、両方の物質の厚さの合計が飽和に達する厚さ以上になるようにする。
- (3) 厚さ方向の吸収線量分布の均一度を良くするため被照射体の反転照射を行なう。
- (4) 被照射体の中心をターゲット中心軸上にセットする。

Table 8~11 に得られた結果を示す。Table 8 は 95 keV の光子エネルギーにおける種々の物質に対する質量エネルギー吸収係数およびラド変換係数  $f_c$ 、Table 9 は平板状の種々の大きさの被照射体をターゲットからの距離が 5、10 および 20 cm にセットした場合の定常出力条件

における被照射体の表面での空間の平均照射線量率 ( $X \cdot f_p$ ) とその均一度  $\alpha_p$ , Table 10 は PMMA, アルミニウムおよび銅の板状被照射体の厚さと深部線量分布に対する平均化係数  $f_d$  および均一度  $\alpha_d$  の関係, Table 11 は PMMA, アルミニウムおよび銅の種々の厚さに対する後方散乱係数  $B_L$  を示す。

Table 8. Mass energy absorption coefficient and conversion factor at photon energy of 95keV.

Material	Mass energy absorption coefficient, $\mu_{en}/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	R-rad conversion factor (rad/R)
H	0.0393	1.453
C	0.0211	0.780
O	0.0239	0.884
Al	0.0420	1.553
Cu	0.350	12.94
Air	0.0235	0.869
Water	0.0257	0.950
Fricke solution	0.0261	0.965
PMMA	0.0235	0.869
CTA	0.0234	0.865
Cobalt glass	0.0300	1.109

Table 9. Average exposure rate and the dose uniformity in the irradiation field for different distances from the target and various sample sizes.

Distance from target (cm)	Sample size (cm×cm)	Average exposure rate $f_p \cdot X$ (R/h)	Uniformity $\alpha_p^*$
5	5 × 10	4.74×10 <sup>5</sup>	1.09
	10 × 10	4.58×10 <sup>5</sup>	1.34
	10 × 20	4.48×10 <sup>5</sup>	1.59
	20 × 20	3.66×10 <sup>5</sup>	4.12
10	5 × 10	3.18×10 <sup>5</sup>	1.17
	10 × 10	3.09×10 <sup>5</sup>	1.33
	10 × 20	2.94×10 <sup>5</sup>	1.66
	20 × 20	2.62×10 <sup>5</sup>	2.67
20	5 × 10	1.62×10 <sup>5</sup>	1.09
	10 × 10	1.59×10 <sup>5</sup>	1.17
	10 × 20	1.51×10 <sup>5</sup>	1.36
	20 × 20	1.45×10 <sup>5</sup>	1.64

\*  $X_{\max}/X_{\min}$

Table 10. Dose averaging factor and the dose uniformity in the depth dose distribution for different sample thickness.

Thickness of sample (g/cm <sup>2</sup> )	Dose averaging factor, $f_d$			Uniformity, $\alpha_d$		
	PMMA	Al	Cu	PMMA	Al	Cu
1.0	0.95	0.88	0.82	1.00	1.03	1.02
2.0	0.90	0.81	0.67	1.01	1.05	1.06
3.0	0.86	0.76	0.56	1.01	1.08	1.17
4.0	0.82	0.71	0.46	1.01	1.12	1.44

Table 11. Backscattering factors as a function of the sample thickness.

Thickness of sample (g/cm <sup>2</sup> )	Backscattering factor, $B_L$		
	PMMA	Al	Cu
1.0	1.06	1.08	1.03
2.0	1.13	1.10	1.03
3.0	1.18	1.10	1.03
4.0	1.21	1.10	1.03

## 9. あとがき

X線照射装置は、照射用線源として広く利用されるには到っていないが、電子線に比べて透過力が大きいこと、RI線源に比べて安全性の点で有利であることなどから比較的低線量ですむ照射に対しては利点があり、今後の利用が期待される。今回の線量評価法に関する研究成果はこの意味で将来のX線源の照射利用に役立つものと考えられる。

ここで得た結果は、比較的原子番号が高いために線量評価が難しかったポリマー含浸コンクリート（PIC）の照射などにすでに適用されており、その有用性が確認されている。さらに今後この線量評価法の信頼性について実験的に追究する必要がある。

この研究においては、多くの線量測定およびモニタリングに加えてスペクトル測定も行われ、それによってX線源の照射技術、線量測定技術に関して多くの有益な知見が得られた。こうした知見は本報の中ではあまり述べてはいないが、技術的な蓄積として残されている。さらに今回の成果は $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線の照射技術上の問題になっている散乱 $\gamma$ 線の影響を究明するのにも役立つものと考えられる。

おわりに標準X線装置の利用に対して御援助を頂いた電子技術総合研究所主任研究官加藤朗氏および直井次郎氏、本実験中の電離箱およびフリッケ線量計による測定に関して御援助を頂いた照射施設課河合視己人氏（現核融合研究部）、また、本X線発生装置の運転に際し種々の便宜をはかって頂いた照射施設課運転第2係長、四本圭一氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば, Brit. J. Radiol. Suppl. No10 (1961)
- 2) 大島, 綿貫, 亀山, 田中; JAERI-M 5223 (1973)
- 3) 田中, 河合, 田島, 田村, 加藤, 山地, 直井, 森内; JAERI-M 6346 (1975)
- 4) F. H. Attix et al; Radiation Dosimetry I 2nd ed., p 331, Academic Press (1968)
- 5) T. E. Burlin; Brit. J. Radiol. 39, 727 (1966)
- 6) E. Storrn and H. I. Israel; LA-3753 (1967)
- 7) 千脇; 電気試験所彙報, 31, No 7, 879 (1967)
- 8) 田中, 四本, 田島, 河合, 水橋, 景山; JAERI-M 5608 (1974)
- 9) ICRU-Report 21, p27 (1972)
- 10) ICRU-Report 17, p5 (1970)
- 11) 大放射線量実用測定法, 放射線照射振興協会, 大線量測定研究委員会編 (1978)
- 12) R. Tanaka, S. Tajima and A. Usami; Intern. J. Appl. Rad. Isotopes. 27, 73 (1976)

## 9. あとがき

X線照射装置は、照射用線源として広く利用されるには到っていないが、電子線に比べて透過力が大きいこと、RI線源に比べて安全性の点で有利であることなどから比較的低線量ですむ照射に対しては利点があり、今後の利用が期待される。今回の線量評価法に関する研究成果はこの意味で将来のX線源の照射利用に役立つものと考えられる。

ここで得た結果は、比較的原子番号が高いために線量評価が難しかったポリマー含浸コンクリート(PIC)の照射などにすでに適用されており、その有用性が確認されている。さらに今後この線量評価法の信頼性について実験的に追究する必要がある。

この研究においては、多くの線量測定およびモニタリングに加えてスペクトル測定も行われ、それによってX線源の照射技術、線量測定技術に関して多くの有益な知見が得られた。こうした知見は本報の中ではあまり述べてはいないが、技術的な蓄積として残されている。さらに今回の成果は $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線の照射技術上の問題になっている散乱 $\gamma$ 線の影響を究明するのにも役立つものと考えられる。

おわりに標準X線装置の利用に対して御援助を頂いた電子技術総合研究所主任研究官加藤朗氏および直井次郎氏、本実験中の電離箱およびフリッケ線量計による測定に関して御援助を頂いた照射施設課河合視己人氏(現核融合研究部)、また、本X線発生装置の運転に際し種々の便宜をはかって頂いた照射施設課運転第2係長、四本圭一氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば, Brit. J. Radiol. Suppl. No.10 (1961)
- 2) 大島, 綿貫, 亀山, 田中; JAERI-M 5223 (1973)
- 3) 田中, 河合, 田島, 田村, 加藤, 山地, 直井, 森内; JAERI-M 6346 (1975)
- 4) F. H. Attix et al; Radiation Dosimetry I 2nd ed., p 331, Academic Press (1968)
- 5) T. E. Burlin; Brit. J. Radiol. 39, 727 (1966)
- 6) E. Storrn and H. I. Israel; LA-3753 (1967)
- 7) 千脇; 電気試験所彙報, 31, No.7, 879 (1967)
- 8) 田中, 四本, 田島, 河合, 水橋, 景山; JAERI-M 5608 (1974)
- 9) ICRU-Report 21, p27 (1972)
- 10) ICRU-Report 17, p5 (1970)
- 11) 大放射線量实用測定法, 放射線照射振興協会, 大線量測定研究委員会編 (1978)
- 12) R. Tanaka, S. Tajima and A. Usami; Intern. J. Appl. Rad. Isotopes. 27, 73 (1976)