

LOW ENERGY (SOFT) X RAYS; DOSIMETRY AND CELL SURVIVAL
低エネルギー（軟）X線；線量測定と細胞生存率

MASAHARU HOSHI, Ph.D. 星 正治
SHIGETOSHI ANTOKU, Ph.D. 安德重敏
WALTER J. RUSSELL, M.D., D.M.Sc.
RICHARD C. MILLER, Ph.D.
NORI NAKAMURA, Ph.D. 中村 典
MASAYOSHI MIZUNO, R.T. 水野正義
SHOJI NISHIO, R.T. 西尾正二



RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION
財 団 法 人 放 射 線 影 響 研 究 所
A Cooperative Japan - United States Research Organization
日 米 共 同 研 究 機 関

ACKNOWLEDGMENT

謝 辞

The authors appreciate the guidance and suggestions of Haruma Yoshinaga, Ph.D., Vice President, Saga Medical College and Shozo Sawada, Ph.D., Professor, Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University. They are indebted to John S. Laughlin, Ph.D. and his associates at the Memorial Sloan-Kettering Cancer Center for their assistance in calibrating the chambers used in this study. They thank Mrs. Hiromi Tagawa and Miss Masumi Enno for helping with the preparation, irradiation, and culture of cells. They are indebted to Mmes. Sachie Masumoto, Setsuko Nakamura, and Yukiko Takase for their great assistance in the preparation of this report.

本研究に際し御指導及び御提言をいただいた佐賀医科大学、吉永春馬副学長と広島大学原爆放射能医学研究所の澤田昭三教授に深く感謝する。また、本研究で用いた電離箱の校正に際し御協力いただいた Sloan-Kettering 記念癌センターの John S. Laughlin 博士らに感謝の意を表す。細胞の準備、照射、培養に協力された田川浩美、遠野真澄の両氏に感謝する。更に、本報告の作成に多大な協力をされた舩本幸江、中村節子、高瀬幸子の各氏に感謝の意を表す。

RERF TECHNICAL REPORT SERIES

放影研業績報告書集

The RERF Technical Reports provide the official bilingual statements required to meet the needs of Japanese and American staff members, consultants, and advisory groups. The Technical Report Series is not intended to supplant regular journal publication.

放影研業績報告書は、日米専門職員、顧問、諮問機関の要求に応えるための日英両語による公式報告記録である。業績報告書は通例の誌上発表論文に代わるものではない。

The Radiation Effects Research Foundation (formerly ABCC) was established in April 1975 as a private nonprofit Japanese Foundation, supported equally by the Government of Japan through the Ministry of Health and Welfare, and the Government of the United States through the National Academy of Sciences under contract with the Department of Energy.

放射線影響研究所(元ABCC)は、昭和50年4月1日に公益法人として発足したもので、その経費は日米両政府の平等分担により、日本は厚生省の補助金、米国はエネルギー省との契約に基づく米国学士院の補助金をもって運営されている。

LOW ENERGY (SOFT) X RAYS; DOSIMETRY AND CELL SURVIVAL

低エネルギー(軟)X線; 線量測定と細胞生存率

MASAHARU HOSHI, Ph.D. (星正治)^{1*}; SHIGETOSHI ANTOKU, Ph.D. (安徳重敏)^{1**};
 WALTER J. RUSSELL, M.D., D.M.Sc.¹; RICHARD C. MILLER, Ph.D.^{2***};
 NORI NAKAMURA, Ph.D. (中村典)²; MASAYOSHI MIZUNO, R.T. (水野正義)¹;
 SHOJI NISHIO, R.T. (西尾正二)¹

Departments of Clinical Studies (Division of Radiology¹) and Radiobiology²

臨床研究部放射線科¹ 及び放射線生物学部²

SUMMARY

Dosimetry of low-energy (soft) X rays produced by the SOFTEX Model CMBW-2 was performed using Nuclear Associates Type 30-330 PTW, Exradin Type A2, and Shonka-Wyckoff ionization chambers with a Keithley Model 602 electrometer. Thermoluminescent (BeO chip) dosimeters were used with a Harshaw Detector 2000-A and Picoammeter-B readout system. Beam quality measurements were made using aluminum absorbers; exposure rates were assessed by the current of the X-ray tube and by exposure times. Dose distributions were established, and the average factors for non-uniformity were calculated. The means of obtaining accurate absorbed and exposed doses using these methods are discussed.

Survival of V79 cells was assessed by irradiating them with soft X rays, 200 kVp X rays, and ⁶⁰Co gamma rays. The relative biological effectiveness (RBE) values for soft X rays with 0, 0.2, 0.7 mm added thicknesses of aluminum were 1.6, which were compared to ⁶⁰Co. The RBE of 200 kVp X rays relative to ⁶⁰Co was 1.3.

Results of this study are available for reference in future RERF studies of cell survival.

要約

SOFTEX CMBW-2型装置から発生した低エネルギー(軟)X線の線量測定をNuclear Associates 30-330 PTW型, Exradin A2型, Shonka-Wyckoff型の電離箱とKeithley 602型エレクトロメーターを使って行った。熱蛍光線量計(BeO素子)をHarshaw 2000-A型とPicoammeter-B読取り装置とともに使用した。アルミニウムの吸収板を用いて線質の測定を行った。また照射線量率が、X線管の電流や照射時間によってどのように変わるかを調べた。線量の分布を確定し、その非等方性を補正する係数を計算した。正確な吸収線量や照射線量をこれらの線量により求める方法を論じた。

V79細胞の致死効果を、軟X線、200 kVp X線、⁶⁰Coガンマ線で照射することにより調べた。0, 0.2, 0.7 mmのアルミニウムのフィルターを使用した場合の軟X線の⁶⁰Coに対する生物学的効果比(RBE)は1.6であった。⁶⁰Coに対する200 kVp X線のRBEは1.3であった。

この研究の結果は将来、細胞の致死効果に対するRBE研究を放影研で進める上での参考となる。

*RERF Part-time Professional Staff and Department of Radiation Biology, Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University

放影研非常勤研究員, 広島大学原爆放射能医学研究所障害基礎研究部門

**RERF Consultant and Department of Experimental Radiology, Faculty of Medicine, Kyushu University
 放影研顧問, 九州大学医学部放射線基礎医学教室

***Radiation Research Laboratories, College of Physicians & Surgeons of Columbia University, New York
 New York州Columbia大学医学部放射線研究所

INTRODUCTION

X-ray apparatuses which produce low-energy (soft) X rays suitable for irradiating biological material are used in experimental studies. Soft X rays are easily attenuated and require no extensive shielding; consequently, soft X-ray machines are relatively inexpensive and can be conveniently located near laboratories. However, the very nature of the poor penetrability by their low-energy photons causes considerable problems in performing accurate dosimetry.

Standard dosimeters are designed to measure relatively high-energy photons and are therefore not only relatively insensitive to soft X rays, they also vary in their sensitivities to X rays, even over relatively narrow ranges of energies. For example, for energies between 30 and 100 keV, the relative sensitivity of some detectors varies from 2.5 to 10. Consequently, even small changes in the spectra of soft X rays can have substantial effects on measured values. Spectral shifts are easily produced by filters and other materials located proximal to the biological target. Though not considered as filtering material, tissue culture media can affect beam quality and intensity.

An X-ray apparatus which produces soft X rays has been in operation at RERF since 1981, for radiobiological studies utilizing cells grown in culture.¹ The comprehensive study reported here was performed to determine this unit's soft X-ray radiation exposure rates and exposures. Beam quality measurements were made using aluminum absorbers, and the absorption by culture media was assessed to obtain the exposure rate at the cells. The uniformity of exposure within the exposure field, the contribution to exposure by scatter radiation, and the stability of the apparatus amperage and voltage output were determined.

Survival curves for Chinese hamster V79 cells were obtained using this soft X-ray machine. Recently the RBEs of low-energy X rays termed as ultrasoft X rays (≤ 5 keV), were discussed by Goodhead,² who assessed cell survival, mutation frequencies, and chromosome aberrations. Relatively large RBEs ranging up to three were obtained. They concluded that ultrasoft X rays are more effective than hard X rays, contradicting Kellerer Rossi's "dual radiation action theory." The effective energy of this soft X-ray unit without additional filtration was about 8 keV.

緒言

生物学的材料の照射に適する低エネルギー(軟)X線を発生させるX線装置が実験研究で使用されている。軟X線は容易に減弱でき、大規模な遮蔽は必要でない。したがって、軟X線装置は比較的安価で、実験室の近くに設置できるという利点がある。しかし、低エネルギー光子の透過性が低いという性質のため、正確な線量測定を行う際、かなり問題がある。

標準的な線量計は、比較的高いエネルギーの光子を測定するように設計されているので、軟X線に対する感度が相対的に低いだけでなく、比較的狭いエネルギー範囲においてさえ、X線に対する感度が変化する。例えば、30～100 keVのエネルギーの場合、ある線量計の相対的感度は2.5から10まで変化する。したがって、軟X線のスペクトルにおける小さな変化でも、測定値に大きな影響を及ぼす可能性がある。フィルター及び生物学的標的に近接するその他の物質によって、容易にスペクトルを変化させることができる。組織培地は、フィルターほどではないが、ビームの質及び強度に影響を及ぼす可能性がある。

1981年以来、放影研では培養によって増殖させた細胞を用いる放射線生物学的研究¹において、軟X線を発生させるX線装置を使用している。本報に述べる総括的な研究は、この装置の軟X線照射線量率及び照射線量を究明するために実施された。アルミニウム吸収板を用いて線質を測定し、培地による吸収を評価し、細胞の照射線量率を求めた。照射野内の照射の均一性、散乱放射線による寄与、及びこの装置の電流と電圧の安定性を調べた。

この軟X線装置を用いてチャイニーズ・ハムスターV79細胞の生存曲線を求めた。最近 Goodhead² は、超軟X線と呼ばれる低エネルギーX線(≤ 5 keV)のRBEについて考察し、細胞生存率、突然変異の頻度、及び染色体異常を検討した。最大3の比較的大きなRBEが得られた。彼は、Kellerer Rossiの“二重放射線作用説”とは矛盾する超軟X線が硬いX線より効果的である事実を結論づけた。付加フィルターを取り付けない場合は、この軟X線装置の実効エネルギーは約8 keVであった。本研究で得られた結果は、硬い

Results obtained in the present study will serve to relate the energies of hard X rays and ultrasoft X rays.

MATERIALS AND METHODS

Dosimeters and Thermoluminescent Dosimetry (TLD) Detectors

A Nuclear Associates Type 30-330 PTW ionization chamber and an Exradin Shonka-Wyckoff Type A2 ionization chamber were used with a Keithley Model 602 electrometer. These chambers were calibrated at various tube voltages with externally added aluminum filters at the Regional Calibration Laboratory of Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, New York. They were also calibrated using a ^{60}Co gamma-ray source at the Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University, and the results are shown in Table 1. The output was measured using a JARP chamber³ which is calibrated annually at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). The Nuclear Associates

X線と超軟X線のエネルギーの関係を調べる上で役立つと考えられる。

材料及び方法

線量計及び熱ルミネッセンス線量 (TLD) 検出器 Nuclear Associates 30-330 PTW 型及び Exradin Shonka-Wyckoff A 2型の電離箱と、Keithley 602型エレクトロメーターを用いた。これらの電離箱は、New York 市 Sloan-Kettering 記念癌センター地方校正研究室で、アルミニウム製外部フィルターを用いて様々な管電圧で校正したものである。また、広島大学原爆放射能医学研究所で ^{60}Co ガンマ線源を用いてこれらの電離箱を校正したが、その結果を表1に示す。出力は、放射線医学総合研究所 (NIRS) で毎年校正を行っている JARP 電離箱³ を用いて

TABLE 1 SENSITIVITIES OF IONIZATION CHAMBERS CALIBRATED AT THE REGIONAL CALIBRATION LABORATORY OF MEMORIAL SLOAN-KETTERING CANCER CENTER (CALIBRATED AT 22°C AND 760 torr)

表1 Sloan-Kettering 記念癌センター地方校正研究室で校正した電離箱の感度 (22°C, 760 torr で校正)

kV	Added Filter (mmAl)	HVL (mmAl)	Exposure rate (Nominal)	Sensitivity (±SD) (R/nC)
<u>Nuclear Associates Type 30-330 chamber</u>				
20	0.018	0.07	18	10.72 (±2.3%)
20	0.546	0.21	4.0	10.87 (±2.3%)
30	0.576	0.32	19	10.77 (±2.3%)
50	1.50	1.05	20	10.57 (±2.2%)
^{60}Co	-	-	52	10.05 (±1.0%)*
(with buildup cap)				
<u>Exradin Type A2 Shonka chamber</u>				
60	2.95	0.10	3.2	0.937 (±1.3%)
75	3.64	0.14	5.7	0.937 (±1.3%)
100	5.20	0.23	12	0.940 (±1.3%)
^{60}Co	-	-	111	0.994 (±2.3%)
(with buildup cap)				
				1.009 (±2.3%)
			52	1.018 (±1.0%)*

*Calibrated with the Keithley electrometer at the Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University.

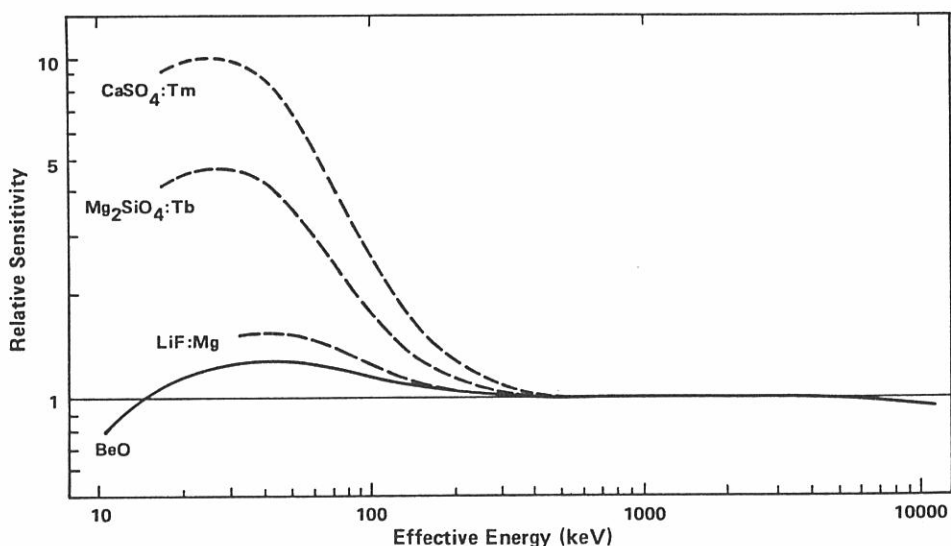
広島大学原爆放射能医学研究所で Keithley エレクトロメーターを用いて校正

chamber was designed to measure very low-energy X rays as those used in mammography. It has an ion collecting volume of 0.2 ml (1.5 mm thick \times 13 mm diameter). The Exradin chamber has a 2 ml collecting volume and an external diameter of 19 mm, which can be used for dosimetry of X rays in diagnostic radiology, exclusive of mammography. The latter chamber was used for measuring relative exposure, to assess dependence on exposure time, current, distance, and uniformity, because its lack of sensitivity for low-energy X rays did not affect the results. BeO detectors (National UD-170L) encased in 1.2 mm \times 8 mm glass tubes of tissue equivalence were also used. The effective atomic number of BeO is 7.13, approximating the 7.4 of living tissue.⁴ Their linear relationship was less than $\pm 5\%$ up to 500 R, allowing their use within this range. Energy characteristics within an effective energy range from 12 keV to 3 MeV were within $\pm 30\%$. Nonlinearity due to absorption by the glass encasement used appeared at an effective energy of less than 15 keV. The effective energy and its relative sensitivity⁵ of BeO and three other detectors are shown in Figure 1.

測定した。Nuclear Associates の電離箱は、乳房撮影で用いられるような極めて低エネルギーの X 線を測定するように設計されている。そのイオン収集容積は 0.2 ml (厚さ 1.5 mm \times 直径 13 mm) である。Exradin の電離箱は、収集容積が 2 ml 外部直径が 19 mm であり、乳房撮影以外の診断用放射線撮影における X 線の線量測定に用いることができる。後者の電離箱は、低エネルギー X 線に対する感度が低いことが結果に影響を及ぼさないような相対的照射線量の測定に用いて、照射時間、電流、距離、及び均一性への依存を評価した。1.2 mm \times 8 mm のガラス管に入れた組織等価な BeO 検出器 (ナショナル UD-170L) も用いた。BeO の実効原子番号は 7.13 であり、生存組織の 7.4 と近似している。⁴ この検出器の直線関係は 500 R までは $\pm 5\%$ 未満なので、この範囲で使用できる。12 keV から 3 MeV までの実効エネルギー範囲内のエネルギー特性値は $\pm 30\%$ 以内であった。使用したガラスケースへの吸収による非線形性は 15 keV 未満の実効エネルギーにおいて現れた。BeO 及びほかの 3 種の検出器の実効エネルギー及びその相対的感度⁵ を図 1 に示す。

FIGURE 1 RELATIVE SENSITIVITY OF VARIOUS TLD TO EFFECTIVE PHOTON ENERGY WHEN THE SENSITIVITY OF ^{60}Co γ RAY IS 1

図 1 ^{60}Co ガンマ線の感度が 1 である場合の実効光子エネルギーに対する様々な TLD の相対的感度



There was approximately 10% fading of the detectors one hour after exposure, and the rate of change gradually decreased, fading an additional 10% within one day. Therefore, measurements were made after allowing them to set for approximately one day following exposure. Each TLD detector was placed in a light-tight case to minimize light fading. Directional dependence was observed in the axes of the glass tubes. Comparisons for 35 keV X rays showed that the sensitivities of the tubes irradiated through their longitudinal axes were 5% less than when irradiated transversely. Exposures were therefore made only in the transverse axis.

X-ray Apparatus

The low-energy X-ray apparatus was a SOFTEX Model CMBW-2 (SOFTEX Company), with a maximum voltage of 60 kVp. The machine's voltage was continuously variable from 0 to 60 kVp, and used full-wave rectification. The X-ray tube was a SOFTEX Model IF-0630 (SOFTEX Company) which had a tungsten target and two focal spots, $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ and $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$. Only the large focal spot ($1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$) was used for dose assessments in the present study, with a maximum current of 5 mA for continuous use and 30 mA for use less than 10 minutes. The focal to surface distances (FSD) from the X-ray target to the bottom surfaces of the 6 cm diameter polystyrene dishes (Falcon Company, USA, Catalog No. 3002, 5.4 cm inner diameter) which were used were 11.6, 20.1, and 28.6 cm. The setup is shown in Figure 2.

Dosimetry

Exposure rates using this X-ray apparatus, and absorption by media and by aluminum were measured using the Nuclear Associates Type 30-330 PTW ionization chamber. Exposures were at 40 and 50 kVp, with 0.2 mmAl and 0.7 mmAl added filtration. Exposures were measured at distances of 11.6, 20.1, and 28.6 cm from the bottom surfaces of the culture dishes. The X-ray beam qualities were determined by measuring their absorption by aluminum at a distance of 20.1 cm. The correlations of readings obtained using the Nuclear Associates Type 30-330 PTW ionization chamber, the Exradin Shonka-Wyckoff A2 chamber, and the TLD detectors were observed according to various X-ray tube voltages. Holes were bored in the centers of the plastic dishes, and the center of the chamber

照射1時間後に、検出器に約10%のフェーディングが認められた。そして、変化率はしだいに減少し、1日のうちに更に10%のフェーディングが見られた。そのため照射後約1日検出器を放置した後、測定を行った。光によるフェーディングを最小限にするために、遮光性のケースに各 TLD 検出器を入れた。ガラス管の軸に方向依存性が認められた。35 keV の X 線について比較を行った結果、縦に照射されたガラス管の感度は、横に照射された場合より 5% 低かった。したがって水平方向でのみ照射を行った。

X線装置

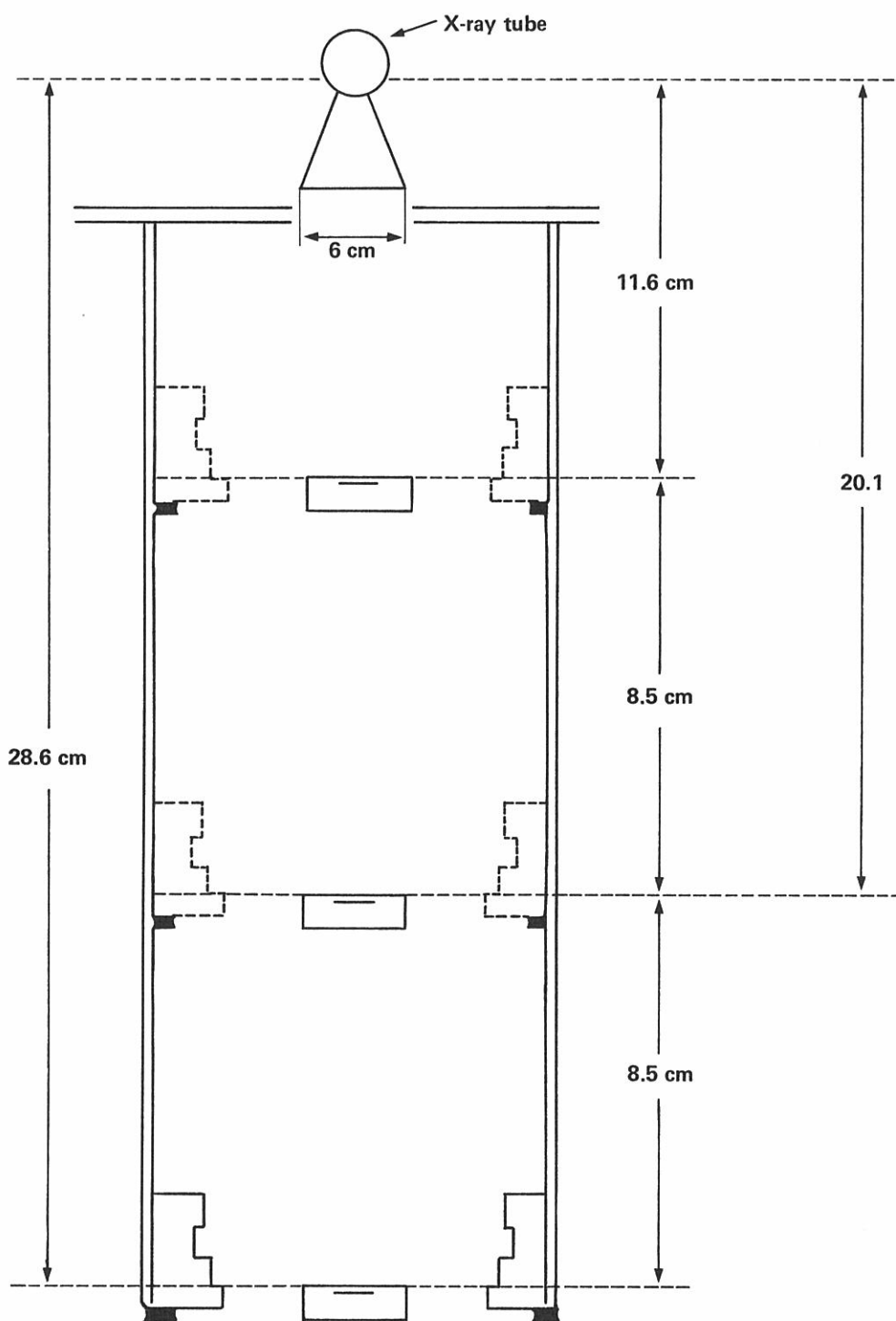
低エネルギー X 線装置として、最大電圧 60 kVp の SOFTEX CMBW-2 型 (SOFTEX 社) を用いた。この装置の電圧は連続的に 0 kVp から 60 kVp まで可変で、全波整流が用いられている。X 線管としては、タングステンの標的及び $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ と $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$ の二つの焦点を備えた SOFTEX IF-0630 型 (SOFTEX 社) を用いている。本研究の線量評価には大きな焦点 ($1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$) のみを用い、連続的に使用する場合は電流を最大 5 mA、10 分間未満の使用の場合は 30 mA とした。X 線標的から直径 6 cm のポリスチレン製培養皿 (米国 Falcon 社、カタログ番号-3002、内部直径 5.4 cm) の底面までの焦点-底面距離 (FSD) は 11.6, 20.1, 28.6 cm とした。この装置を図 2 に示す。

線量測定

この X 線装置を用いたときの照射線量率及び培地とアルミニウムによる吸収を、Nuclear Associates 30-330 PTW 型電離箱を用いて測定した。0.2 mmAl と 0.7 mmAl の付加フィルターを用いて 40 及び 50 kVp で照射を行った。培養皿の底面から 11.6, 20.1, 28.6 cm の距離で照射線量を測定した。20.1 cm の距離でアルミニウムによる吸収を測定することにより、X 線の線質を調べた。様々な X 線管電圧により、Nuclear Associates 30-330 PTW 型電離箱、Exradin Shonka-Wyckoff A2 型電離箱、及び TLD 検出器を用いて得た数値の相関関係を調べた。プラスチック製培養皿の中央に穿孔し、電離箱の中央とこれらの穴

FIGURE 2 SOFT X-RAY UNIT

図 2 軟 X 線装置

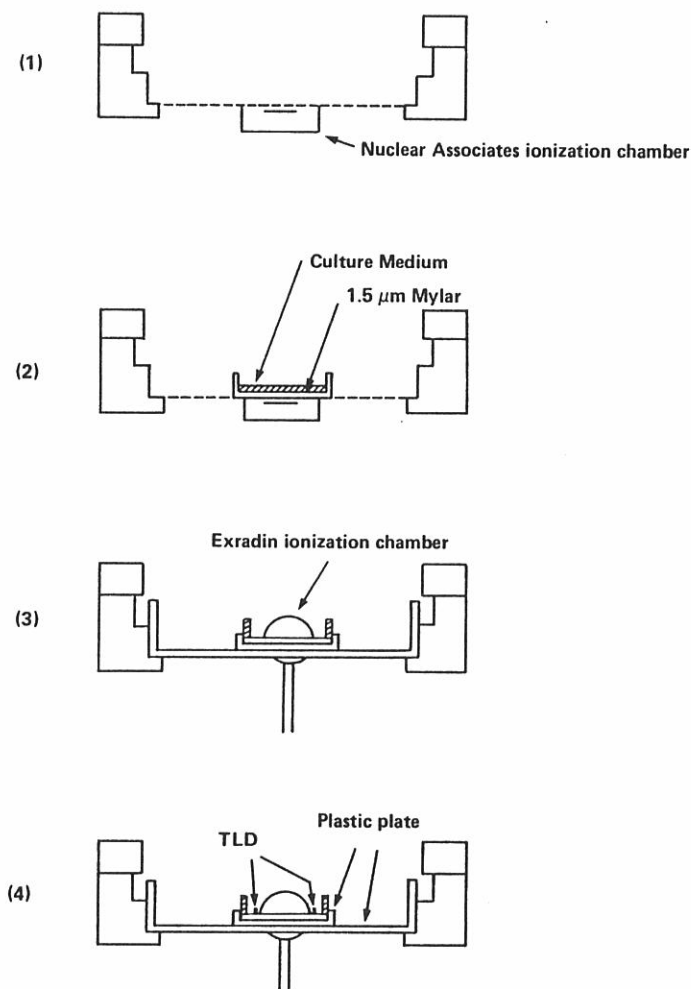


and these holes were aligned as shown in Figure 3. When the TLD detectors and the Exradin chamber were irradiated simultaneously, the TLD detectors were placed lateral to the chamber on both sides.

が図3で示すように一列になるようにした。TLD検出器と Exradin の電離箱を同時に照射したときには、TLD 検出器を電離箱の両側に置いた。

FIGURE 3 (1) WITH THE SURFACE OF THE NUCLEAR ASSOCIATES IONIZATION CHAMBER AT THE LEVEL OF THE BASE OF THE DISH. THE DISH WAS REMOVED DURING DOSIMETRY. (2) WHEN MEASURING MEDIUM ABSORPTION IN THE DISHES. (3) WITH PLASTIC DISHES USING THE EXRADIN IONIZATION CHAMBER. (4) WHEN EXPOSURES WERE MADE USING THE EXRADIN IONIZATION CHAMBER SIMULTANEOUSLY WITH TLD DETECTORS FOR CALIBRATION
(Figures are not drawn to scale)

図3 (1) 培養皿の底の位置に Nuclear Associates 電離箱の表面を合わせた場合、線量測定中は培養皿は取り除く。(2) 培養皿の培地による吸収を測定するとき。(3) Exradin 電離箱とプラスチック製培養皿を用いた場合。(4) 校正のために TLD 検出器と同時に Exradin 電離箱を用いて照射を行ったとき、[図は縮尺のとおりではない]



The irradiated materials consisted of cells in medium; therefore, the absorption of X rays in Eagle's MEM supplemented with 10% fetal bovine serum (FBS) were studied. To study absorption by the medium, the Nuclear Associates Type 30-330 PTW ionization chamber was placed under the plastic dish as shown in Figure 3(2). For this measurement, 1.5 μm thick Mylar was substituted for the bottoms of the dishes. When TLD detectors were used, they were placed in the centers of the dishes without modification. With Exradin chambers beneath the dishes, the absorption by the bottoms of the dishes was determined.

The X-ray apparatus was evaluated for 1) variations in exposure per mAs by exposure time, 2) variations in exposure per mAs, by X-ray tube current, and 3) the effect of scattering X-ray absorption arising from the aluminum stand supporting each plastic dish.

Both the ionization chambers and the TLD detectors were used to determine the X-ray distribution at distances of 11.6 and 20.1 cm, at X-ray tube voltages of 40 kVp for TLD detector, and 40 and 50 kVp for the ionization chamber - all at 4-6 mA, and for exposure times of 1 to 12 sec using 0.2 mm added aluminum filtration. The setups are shown in Figure 3.

In the measurements of beam qualities by aluminum absorption, aluminum plates were inserted 12.3 cm above the Nuclear Associates chamber, that was 7.8 cm below the target of the X-ray tube. The X-ray beams were collimated to 6 cm diameter just above the aluminum plates. In view of the energy range of this apparatus, there is mainly a photoelectric effect, and very little Compton effect or elastic scattering. Therefore, nearly all of the X rays were directly absorbed, without appreciable scattering.

Cells, Culture Medium, and Irradiation

Chinese hamster V79 cells were cultured with the same medium and plastic dishes as those used in the dosimetry study. The SOFTEX apparatus was operated using three sets of technical factors: 50 kVp with 0.7 mm aluminum filter, 40 kVp with 0.2 mm aluminum filter, and 40 kVp without added filter. The distances from the focal point of the X-ray tube to the dish surfaces for these three setups were 11.6, 20.1 and

照射材料は培地内の細胞である。したがって、10% 牛胎児血清 (FBS) を添加した Eagle MEM による X 線の吸収を調べた。培地による吸収を調べるために、図 3 (2) に示すように Nuclear Associates 30-330 PTW 型電離箱をプラスチック製培養皿の下に取り付けた。この測定では、培養皿の底の代わりに厚さ 1.5 μm のマイラーを使用した。TLD 検出器を用いたときには、このような変更を行わず、培養皿の中央に置いた。また、培養皿の下に Exradin の電離箱を取り付け、培養皿の底面の吸収を調べた。

1) 照射時間別 mAs 当たりの照射線量の変化、
2) X線管の電流別 mAs 当たりの照射線量の変化、
並びに 3) 各々のプラスチック製培養皿を支えるアルミニウム製の台による散乱 X 線の吸収の影響について X 線装置を評価した。

電離箱と TLD 検出器を用いて、距離 11.6 cm と 20.1 cm の場合の X 線分布を調べた。X 線管電圧が TLD 検出器の場合は 40 kVp、電離箱の場合は 40 及び 50 kVp、電流は常に 4 ~ 6 mA、照射時間 1 ~ 12 秒で 0.2 mm のアルミニウム製付加フィルターを用いた。この装置を図 3 に示す。

アルミニウムの吸収による線質の測定では、Nuclear Associates の電離箱の 12.3 cm 上方、すなわち X 線管の標的の 7.8 cm 下にアルミニウム製プレートを挿入した。アルミニウム製プレートのすぐ上で、X 線ビームの直径を 6 cm にコリメートした。この装置のエネルギー範囲を考慮すると、光電効果が主であり、コンプトン効果や弾性散乱はほとんどない。したがって散乱はほとんどなく、大部分の X 線が直接吸収される。

細胞、培地、照射

線量測定で用いたものと同じ培地及びプラスチック製培養皿を使用し、チャイニーズ・ハムスター V79 細胞を培養した。50 kVp で 0.7 mm のアルミニウム製フィルター、40 kVp で 0.2 mm のアルミニウム製フィルター、40 kVp で付加フィルターなし、という 3 通りの照射条件で SOFTEX 装置を作動させた。これら 3 通りの装備では、X 線管の焦点から培養皿の底面までの

28.6 cm. Exposures were made using 200 kVp X rays from a conventional apparatus and gamma rays from a ^{60}Co source at the Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University as control irradiations. Outputs were measured using JARP chambers, the Exradin Type A2 Shonka chamber, and a Capintec chamber (PR-06C).

RESULTS

Dosimetry

The doses at 40 and 50 kVp with 0.2 mmAl filtration were from 16% to 29% higher than the values stipulated by the manufacturer, the SOFTEX Company. The results are shown in Table 2.

距離は11.6, 20.1, 28.6 cmであった。対照のための照射として、従来の装置である200 kVp X線と広島大学原爆放射能医学研究所の ^{60}Co 線源からのガンマ線を用いて照射を行った。JARP 電離箱, Exradin A2 Shonka 型電離箱, Capintec 電離箱 (PR-06C) を用いて出力を測定した。

結 果

線量測定

0.2 mmのアルミニウムフィルターを用いて40及び50 kVpで測定した線量は、製造業者であるSOFTEX社が明記した値より16%から29%高かった。結果を表2に示す。

TABLE 2 X-RAY OUTPUT MEASURED BY NUCLEAR ASSOCIATES
TYPE 30-330 IONIZATION CHAMBER

表2 Nuclear Associates 30-330型電離箱によって測定した
X線放射線出力

Distance (cm)	kV	Added Filter (mmAl)	Exposure rate (R/mAs)
20.1	40	0.2	0.952
20.1	40	0.7	0.186
20.1	50	0.2	1.32
20.1	50	0.7	0.286
11.6	40	0.2	3.27
11.6	40	0.7	0.634
11.6	50	0.2	4.63
11.6	50	0.7	0.973

Geometry is shown in Figure 3(1).

図3(1)に配置図を示す。

The chamber was exposed to 5 mA for 10 sec.

10秒間5 mAで電離箱を照射。

X-ray absorption by aluminum was assessed using the Nuclear Associates chamber at 20.1 cm and is shown in Figure 4.

The half-value layers (HVLs) of X rays at 40 and 50 kVp and with various thicknesses of added filtration were obtained from Figure 4. Assuming that X rays attenuate according to the following formula:

20.1 cmで Nuclear Associates の電離箱を用いてアルミニウムによるX線吸収を評価した。その結果を図4に示す。

40及び50 kVpで様々な厚さの付加フィルターを用いた場合のX線の半価層(HVL)を図4から求めた。下記の式に従ってX線が減弱すると仮定すると、

$$I = I_0 \exp(-\mu_{\text{eff}}h) \quad [1]$$

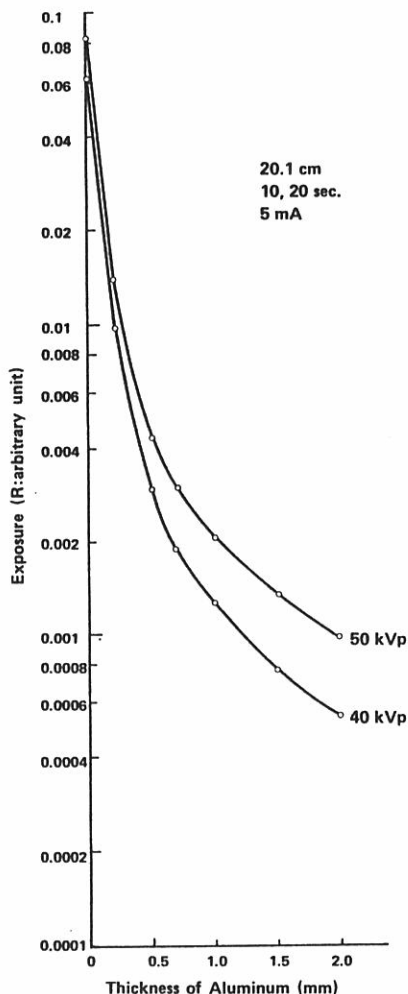


FIGURE 4 ABSORPTION CURVE BY ALUMINUM

図4 アルミニウムによる吸収曲線

the effective absorption coefficient, μ_{eff} , can be obtained. And, using the value 2.69 as the specific gravity of aluminum, μ_{eff} from the HVLs of aluminum can be obtained on the basis of

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\ln 2}{\text{HVL}}$$

by substituting the HVLs for h. The effective photon energies obtained are shown in Table 3. The conversion coefficient from exposure (R) to absorbed dose (rad) is obtained by interpolation.⁶ The conversion coefficients for muscle are also shown in Table 3. Correlation of doses according to distances from the focal spot were assessed as shown in Figure 5. Figure 5 shows that the slopes of the two curves obtained by the least-squares method are -2.2. The

有効吸収係数 μ_{eff} を求めることができる。更に、アルミニウムの比重を2.69とし、hをHVLに置き換えることにより、

[2]

に基づいて、アルミニウムの HVL からの μ_{eff} を求めることができる。求めた実効光子エネルギーを表3に示す。照射線量 (R) から吸収線量 (rad) への変換係数は内挿法によって求める。⁶ 筋肉に対する変換係数も表3に示す。焦点からの距離と線量の相関は図5に示すとおりである。図5は最小自乗法によって求めた2本の曲線の傾きが-2.2であることを示している。

TABLE 3 THE HVLs AND THE EFFECTIVE ENERGIES OF SOFTEX APPARATUS

表3 SOFTEX 装置の HVL と実効エネルギー

Added Filtration (mmAl)	HVL mmAl		μ_{eff} keV		f-factor rad/R	
	40 kVp	50 kVp	40 kVp	50 kVp	40 kVp	50 kVp
0	0.06	0.06	8.1	8.4	0.915	0.915
0.2	0.16	0.16	11.7	11.9	0.915	0.915
0.5	0.38	0.44	15.5	16.3	0.916	0.916
0.7	0.58	0.65	17.8	18.5	0.915	0.915

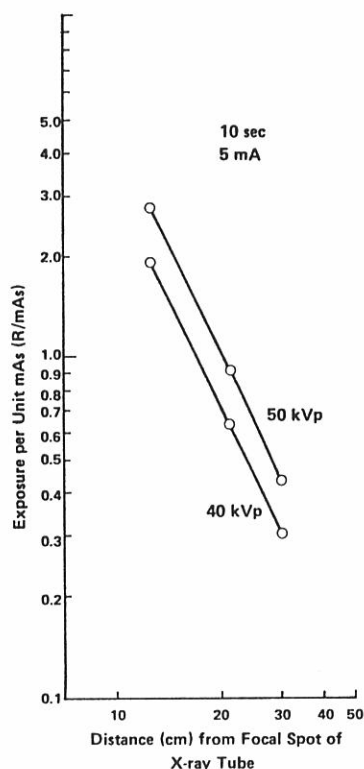


FIGURE 5 CORRELATION BETWEEN X-RAY OUTPUT AND DISTANCE

図5 X線放射線出力と距離の相関関係

discrepancy from -2.0 may arise from an error in measuring the distance from the focal spot to the chamber (FCD), and from absorption of the soft X rays by air. Correlations between X-ray tube voltages and ionization chamber readings, and between X-ray tube voltages and thermoluminescence readings at a distance of 20.1 cm are shown in Figures 6(1) and 6(2). A sensitivity of 0.937 is assumed for the Exradin chamber since a value is not stipulated. The ratios of the thermoluminescence readings to the Nuclear Associates ionization chamber readings according to X-ray tube voltages is shown in Figure 7.

-2.0との差異は、焦点から電離箱までの距離 (FCD) の測定の見誤差、及び空気による軟X線の吸収によって生じたのかもしれない。20.1cmの距離におけるX線管電圧と電離箱の数値との相関関係、及びX線管電圧と熱ルミネッセンスの数値との相関関係を図6(1)及び6(2)に示す。Exradinの電離箱の感度は明記されていないので0.937と仮定する。様々なX線管電圧でのNuclear Associates電離箱と熱ルミネッセンスから得た数値の比率を図7に示す。

FIGURE 6 (1) X-RAY TUBE VOLTAGE AND OUTPUT EXPOSURE MEASURED BY IONIZATION CHAMBERS. (2) X-RAY TUBE VOLTAGE AND OUTPUT EXPOSURE MEASURED BY TLD DETECTOR

図6 (1) X線管電圧と電離箱によって測定した照射線量. (2) X線管電圧とTLD検出器によって測定した照射線量

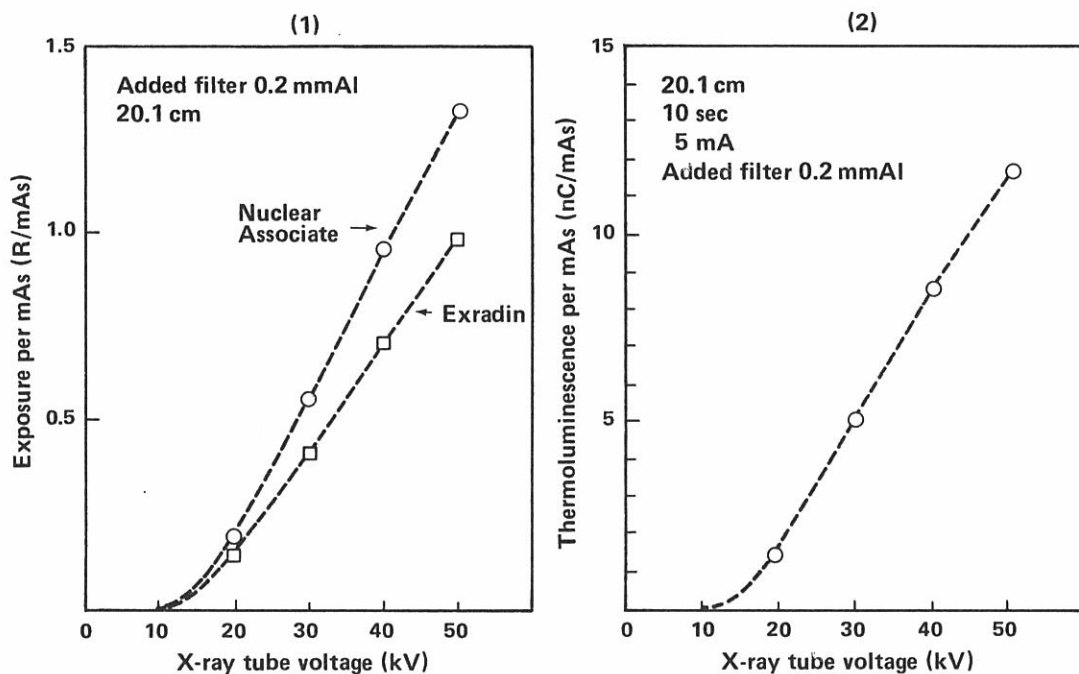
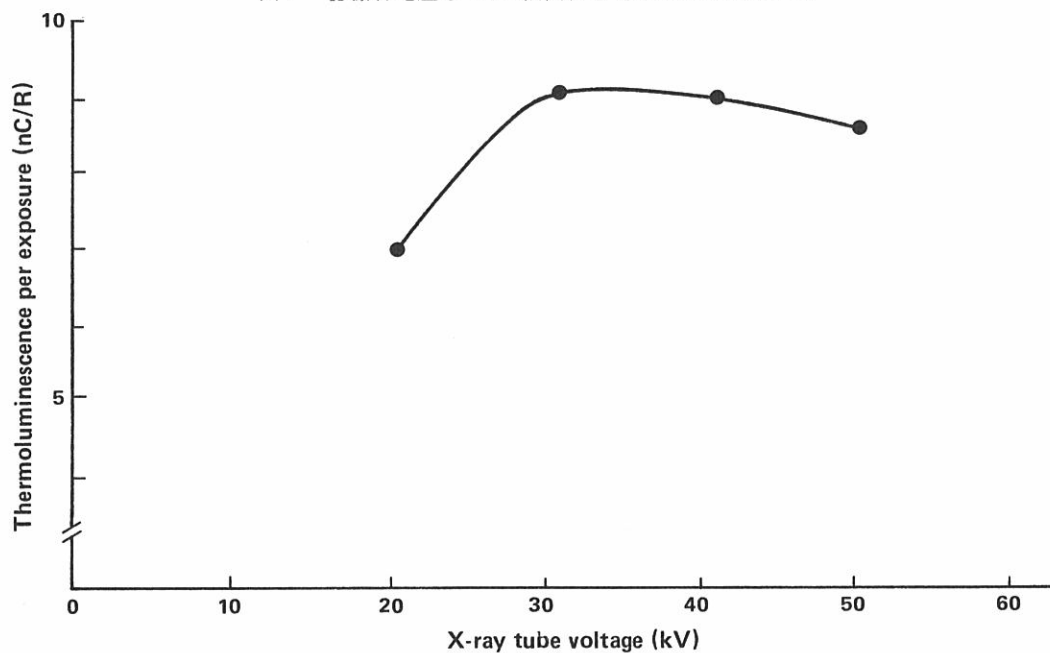


FIGURE 7 X-RAY TUBE VOLTAGE VS SENSITIVITY RATIO OF TLD DETECTOR AND IONIZATION CHAMBER

図7 X線管電圧とTLD検出器と電離箱の感度の比率



X-ray absorption by the medium was assessed under the conditions shown in Figure 3(2). When using the chamber, 0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, and 8.0 ml medium were added to the dish and 0.2 mm or 0.7 mm aluminum filters were added. The results are shown in Figures 8(1) to 8(4). Absorption of 1.5 μ m Mylar was measured, but it was negligible. The depth of 1 ml volume medium was 0.44 mm. The HVLs with 0.2 mm Al filters obtained from Figure 8 were 4.1 and 4.3 ml for 40 and 50 kVp, respectively. These values correspond to medium thicknesses of 1.8 mm and 1.9 mm. Considering only the water component of the medium, these thicknesses correspond to energies of 10.8 and 11.0 keV, respectively. Results using TLD detectors at a distance of 20.1 cm are shown in Table 4 and Figure 9. These include backscatter from the dishes, and since the measurements were made within the medium, they represent the actual state except for X-ray energies lower than 20 kVp, where the sensitivity (response) of TLD detector was less (Figure 7). The HVLs of the medium as obtained

図3(2)に示した条件の下で培地によるX線吸収を評価した。電離箱を用いたときには、0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 mlの培地を培養皿に入れ、0.2 mm又は0.7 mmのアルミニウム製フィルターを取り付けた。図8(1)～8(4)にその結果を示す。1.5 μ mのマイラーによる吸収を測定したが、無視できる量であった。1 mlの培地の深さは0.44 mmであった。図8から求めた0.2 mmアルミニウム製フィルターの場合のHVLは、40及び50 kVpでは各々4.1及び4.3 mlであった。これらの値は培地の厚さ1.8 mmと1.9 mmに相当する。培地の水成分のみを考慮に入れると、これらの厚さは各々10.8及び11.0 keVのエネルギーに相当する。20.1 cmの距離でTLD検出器を用いた結果を表4及び図9に示す。これらには培養皿からの後方散乱が含まれており、また、培地内で測定を行ったので、TLD検出器の感度(反応)が低い20 kVp未満のX線エネルギー(図7)を除いた実際の状態を示している。図9から得られた培地のHVLは約4.5 ml

FIGURE 8 CORRELATION BETWEEN VOLUME OF MEDIUM AND TRANSMITTED DOSE AS MEASURED BY THE NUCLEAR ASSOCIATES IONIZATION CHAMBER WITH FSD OF 20.1 cm. VERTICAL AXIS DESCRIBED PER mAs

図8 Nuclear Associates 電離箱によりFSD 20.1 cmで測定した透過線量と培地の容積の相関関係。縦軸は mAs 当たりの値

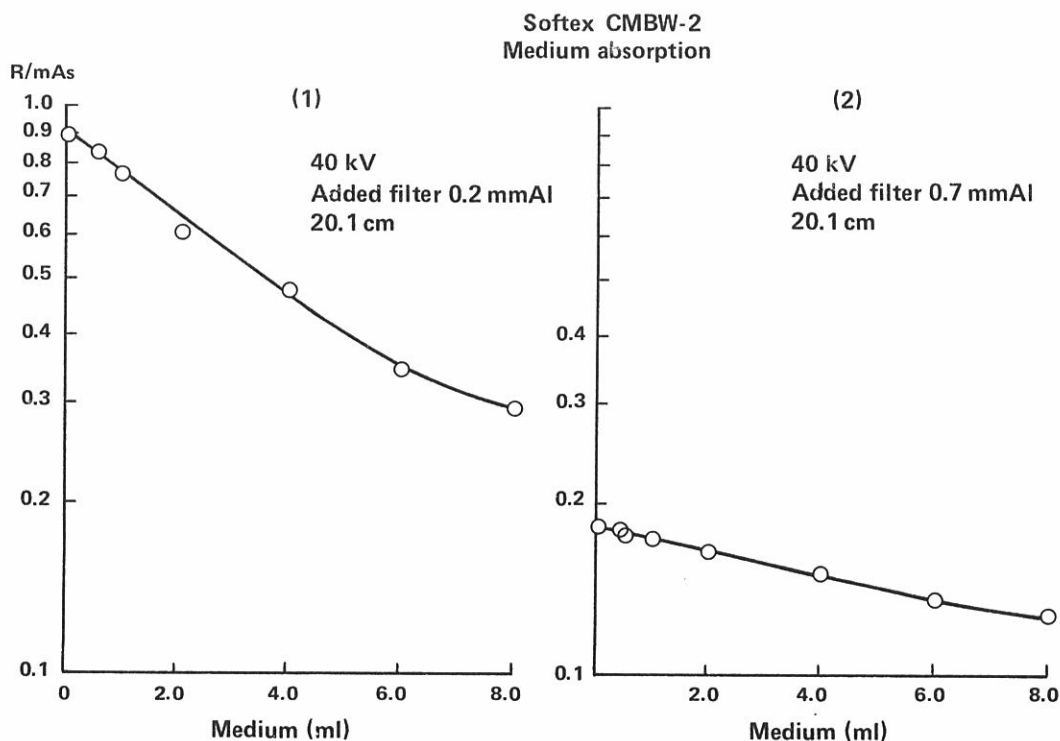


FIGURE 8 CORRELATION BETWEEN VOLUME OF MEDIUM AND TRANSMITTED DOSE AS MEASURED BY THE NUCLEAR ASSOCIATES IONIZATION CHAMBER WITH FSD OF 20.1 cm. VERTICAL AXIS DESCRIBED PER mAs

図8 Nuclear Associates 電離箱により FSD 20.1cm で測定した透過線量と培地の容積の相関関係。縦軸は mAs 当たりの値

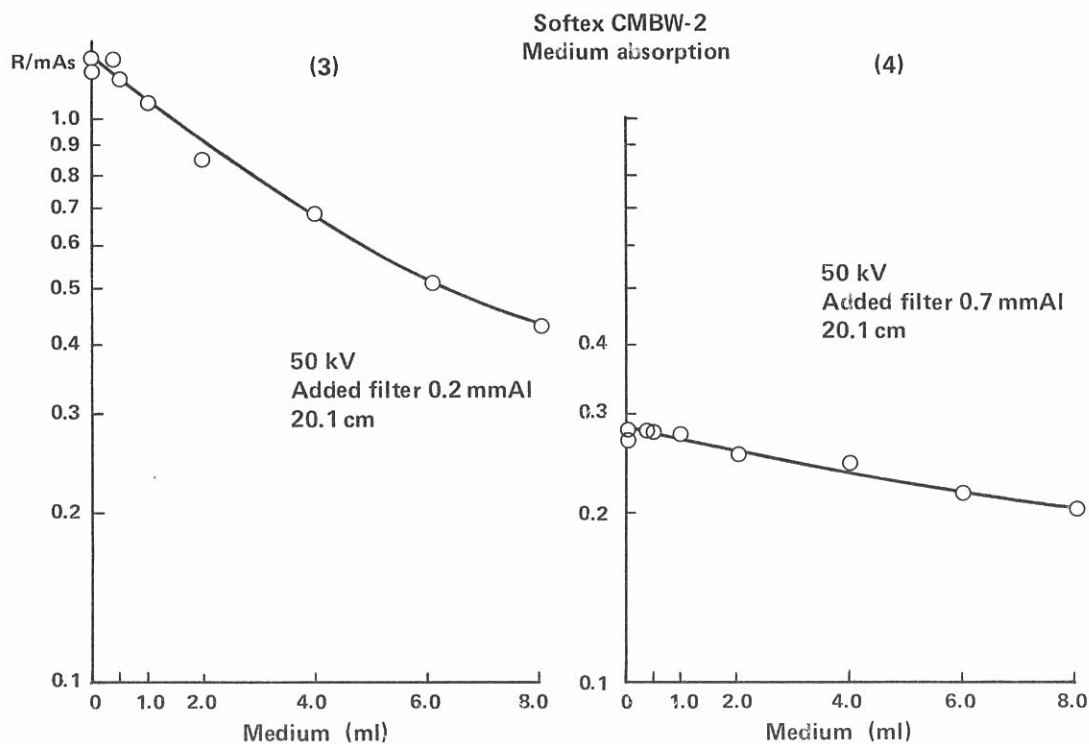


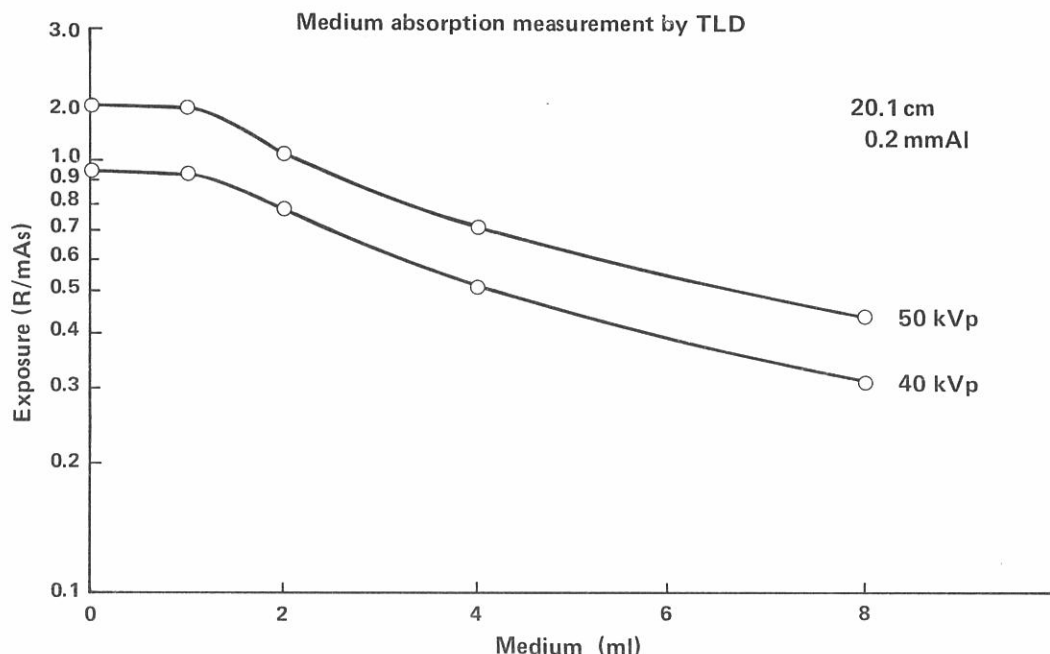
TABLE 4 DOSE IN MEDIUM ACCORDING TO TLD, EXPOSURE TO 4mA FOR 12 sec, AT 20.1 cm

表4 20.1cm, 4 mA で12秒間照射した場合の TLD による
培地内の線量

Medium ml	Voltage kVp	Exposure R/mAs
0	40	0.952
1	40	0.939
2	40	0.789
4	40	0.521
8	40	0.313
0	50	1.32
1	50	1.33
2	50	1.07
4	50	0.704
8	50	0.438

FIGURE 9 CORRELATION BETWEEN MEDIUM VOLUME AND DOSE, MEASURED BY TLD DETECTOR. TLD DETECTOR WAS IMMERSSED IN MEDIUM AT BASE OF DISH. THE VERTICAL AXIS DESCRIBED PER mAs

図9 培地の容積と TLD 検出器で測定した線量の相関関係。培養皿の底面の培地内に TLD 検出器を入れた。縦軸は mAs 当たりの値



from Figure 9 were about 4.5 ml and correspond to a thickness of about 2.0 mm. This result was similar to those obtained using the Nuclear Associates chamber. The X-ray absorption curves for the plastic dishes as measured by the Exradin chamber are shown in Figure 10. The HVLs of the plastic dishes were 6.0 mm and 6.3 mm at 40 and 50 kVp, respectively. The bottoms of the dishes were 1 mm thick.

The characteristics of the timer and current of the X-ray generator are shown in Figures 11 and 12, respectively. The exposures per mAs tended to decrease with exposure times shorter than 10 sec, as shown in Figure 11. However, those exposed between 10 sec and 5 minutes agreed, within 0.5%. The correlation between current and exposure per mAs is shown in Figure 12. The currents ranged from 3 to 10 mA. The values at 40 kVp and 3 mA were less than at 40 kVp and 5 mA by approximately 10%. This shows that a current less than 3 mA should not be used.

であり、約 2.0 mm の厚さに相当する。この結果は Nuclear Associates の電離箱を用いて得られた結果と類似している。Exradin の電離箱で測定したプラスチック製培養皿の X 線吸収曲線を図 10 に示す。プラスチック製培養皿の HVL は 40 及び 50 kVp で各々 6.0 mm と 6.3 mm であった。培養皿の底の厚さは 1 mm であった。

X 線発生装置のタイマー及び電流の特性を各々図 11 と 12 に示す。図 11 に示すとおり、10 秒以下の照射時間では単位 mAs 当たりの照射線量は減少する傾向がある。しかし、10 秒以上 5 分間まで照射したものについては、0.5% 以内の一致が認められた。電流と mAs 当たりの照射線量との相関関係を図 12 に示す。電流の範囲は 3 ~ 10 mA であった。40 kVp, 3 mA での値は 40 kVp, 5 mA での値より約 10% 低かった。このことは、3 mA 未満の電流を用いるべきでないことを示している。

FIGURE 10 X-RAY ABSORPTION CURVE FOR PLASTIC DISHES

図10 プラスチック製培養皿のX線吸収曲線

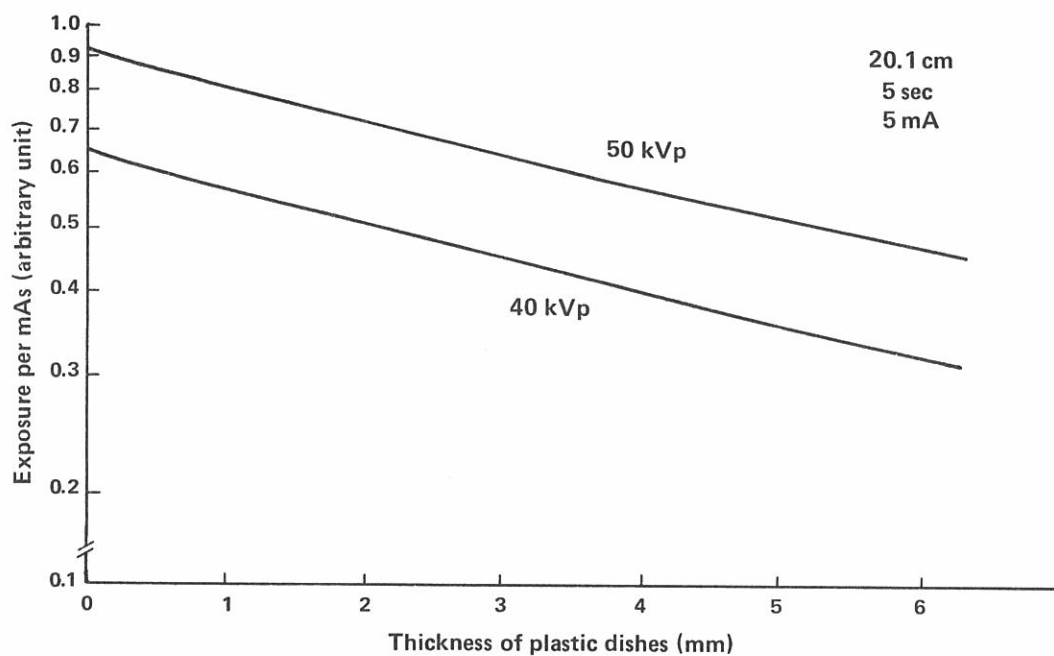
FIGURE 11 CORRELATION BETWEEN EXPOSURE PER mAs AND EXPOSURE TIME.
NORMALIZED TO FIVE SEC

図11 mAs 当たりの照射線量と照射時間との相関関係. 5秒に正規化

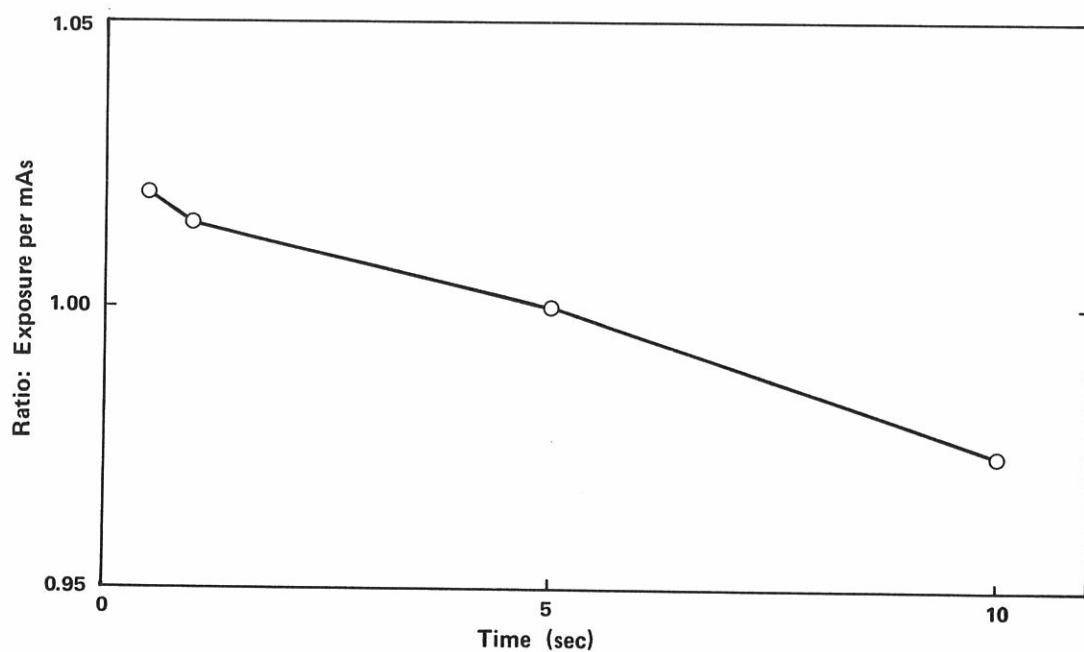
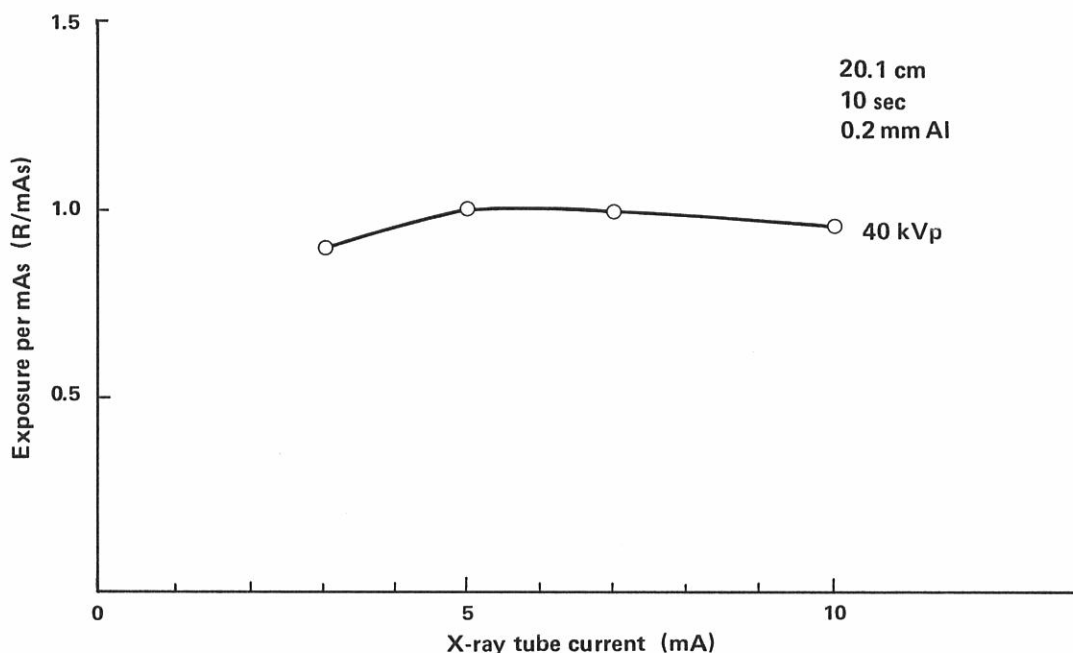


FIGURE 12 X-RAY TUBE CURRENT AND EXPOSURE PER mAs

図12 X線管電流と mAs 当たりの照射線量率



Changes in exposures due to X-ray scatter or absorption were assessed by comparing results with and without the aluminum support for the dish, and differences were within 2%. Such a difference is likely to result from the degree of stability of the X-ray machine. To assess uniformity of exposures within exposure fields, exposure distributions were measured using the Exradin ionization chamber and TLD detectors as shown in Figures 13(1) and 13(2). The aluminum support for the dish was used, but plastic dishes were not used; paper was substituted for the dish, to accommodate the TLD detectors. With the chamber, 40 and 50 kVp, 5 mA, five sec and a FSD of 20.1 cm were used. TLD measurements were made at 40 kVp, 4-5 mA, and 10 and 12 sec, and 20.1 and 11.6 cm FSDs. The results using the chamber are shown in Figures 14(1) and 14(2), and using TLD detectors in Figures 15(1) and 15(2). Assuming the exposure at the geometrical center to be 1, isoexposure curves were drawn at 5% intervals. Exposures in Figures 15(1) and 15(2) were averaged and correction factors were obtained for convenience. The results are shown in Figure 16.

培養皿にアルミニウム製の台を取り付けた場合と取り付けない場合の結果を比較することにより、X線の散乱又は吸収による照射線量率の変化を調べたところ、差は2%以内であった。このような差異は、X線装置の安定の程度によると考えられる。照射野内の照射の均一性を調べるために、図13(1)及び13(2)に示すようにExradinの電離箱とTLD検出器を用いて照射線量率分布を測定した。培養皿用のアルミニウム製の台は用いたが、プラスチック製の培養皿は用いなかった。TLD検出器を置くために培養皿の代わりに紙を用いた。電離箱の場合は、40及び50 kVp, 5 mA, 5秒, FSD 20.1 cmという条件を用いた。TLD測定は、40 kVp, 4~5 mA, 10及び12秒, FSD 20.1及び11.6 cmという条件で行った。電離箱を用いた結果を図14(1)及び14(2)に、TLD検出器を用いた結果は図15(1)及び15(2)に示す。幾何学的中心の照射線量を1と仮定し、5%間隔で等量照射線量曲線を描いた。図15(1)と15(2)の照射線量を平均し、便宜上、補正係数を求めた。結果を図16に示す。

FIGURE 13 SETUP FOR DETERMINING DISTRIBUTION OF X-RAYS OVER A FLAT SURFACE, USING (1) IONIZATION CHAMBER

図13 平らな表面上のX線の分布を決定するための装置；（1）電離箱を用いた場合

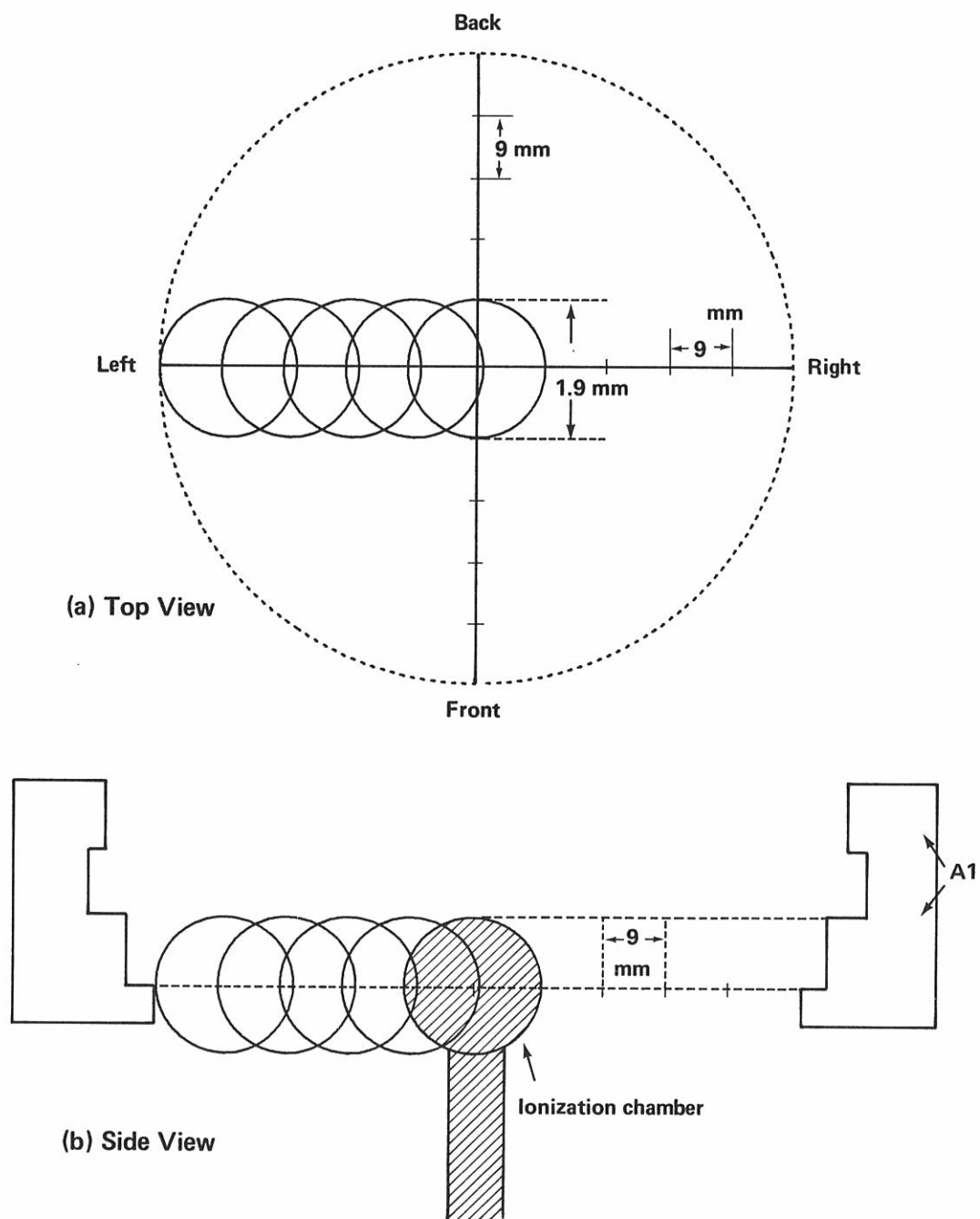


FIGURE 13 SETUP FOR DETERMINING DISTRIBUTION OF X-RAYS OVER A FLAT SURFACE, USING (2) TLD DETECTOR

図13 平らな表面上のX線の分布を決定するための装置；(2) TLD 検出器を用いた場合

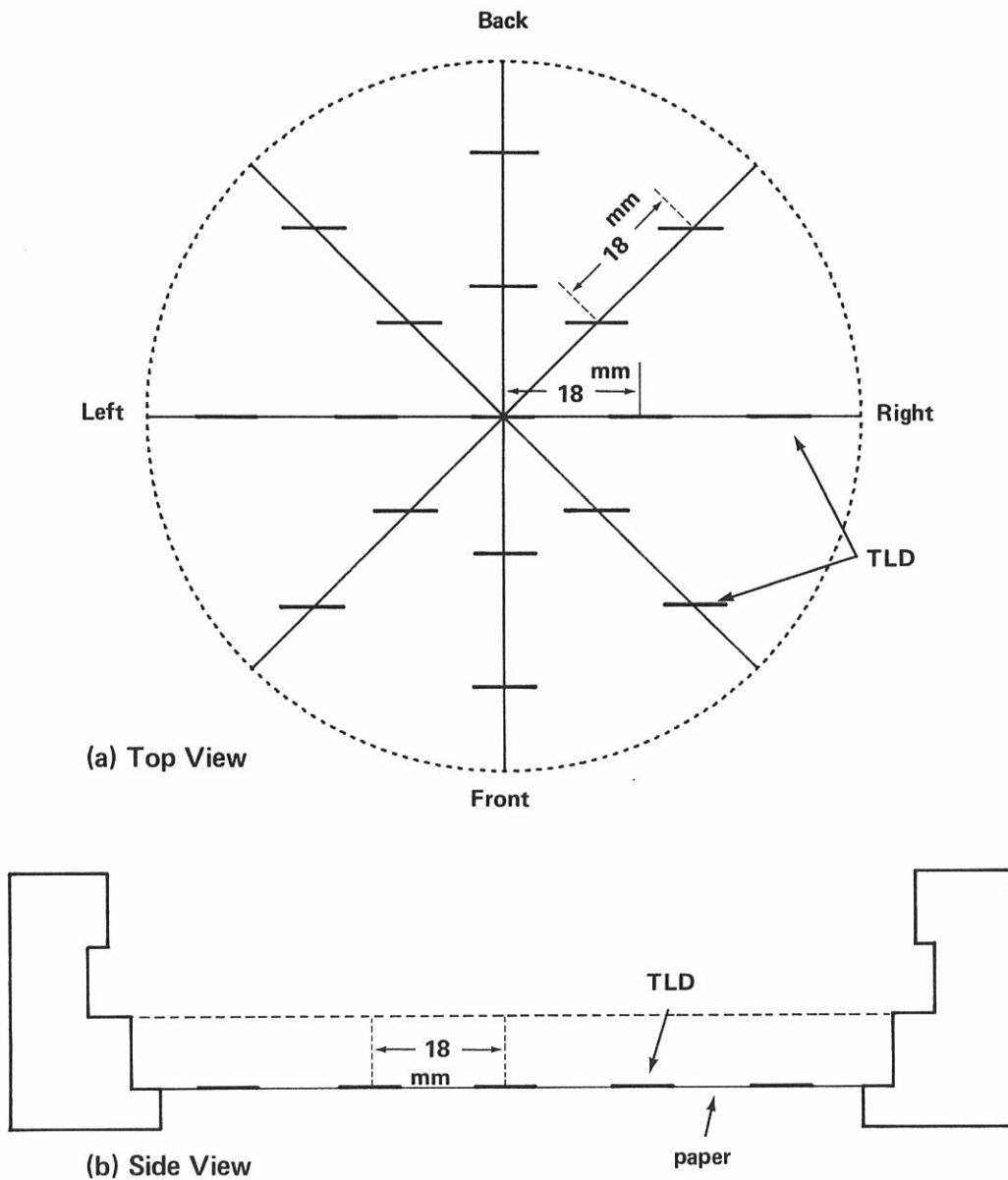


FIGURE 14 X-RAY DISTRIBUTION DETERMINED USING IONIZATION CHAMBER.
(1) 40 kVp, 20.1 cm; (2) 50 kVp, 20.1 cm. DATA SHOWN ARE RELATIVE TO
GEOMETRICAL CENTER NORMALIZED TO BE 1

図14 電離箱を用いて決定したX線の分布. (1) 40 kVp, 20.1cm (2) 50 kVp, 20.1cm.
幾何学的中心を1に正規化し、それに対する比率を示す

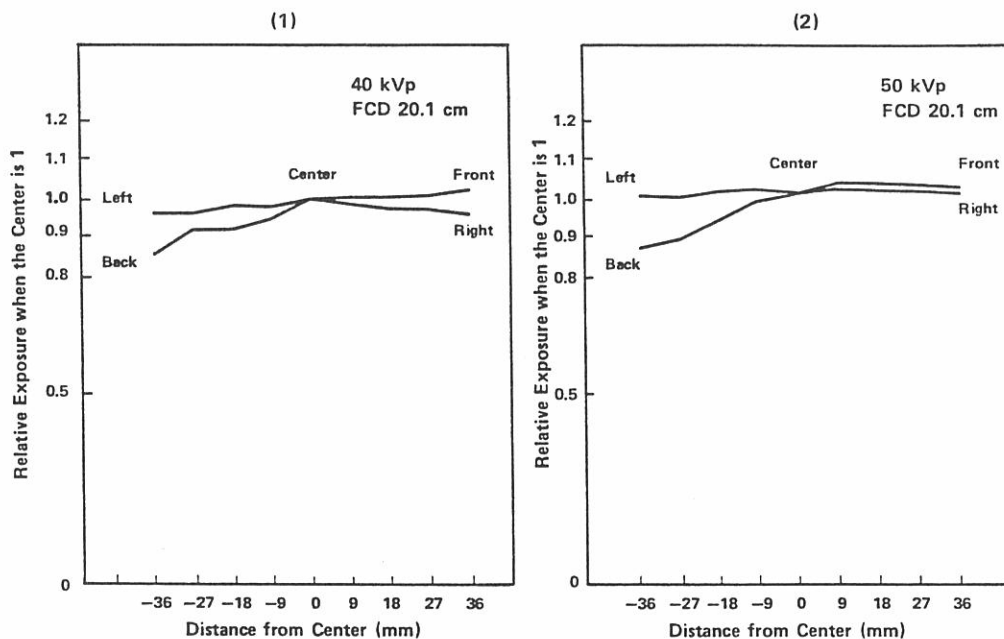


FIGURE 15 X-RAY DISTRIBUTION DETERMINED USING TLD DETECTOR. DATA
ARE RELATIVE TO A MEDIAN VALUE OF 1. THE ISOEXPOSURE CURVES
WERE DRAWN AT 5% INTERVALS. (1) 40 kVp, 11.6 cm; (2) 40 kVp, 20.1 cm

図15 TLD 検出器を用いて決定したX線の分布. このデータは中央値1に対する比率で
ある. 等線量曲線を5%間隔に描いた. (1) 40 kVp, 11.6cm, (2) 40 kVp, 20.1cm

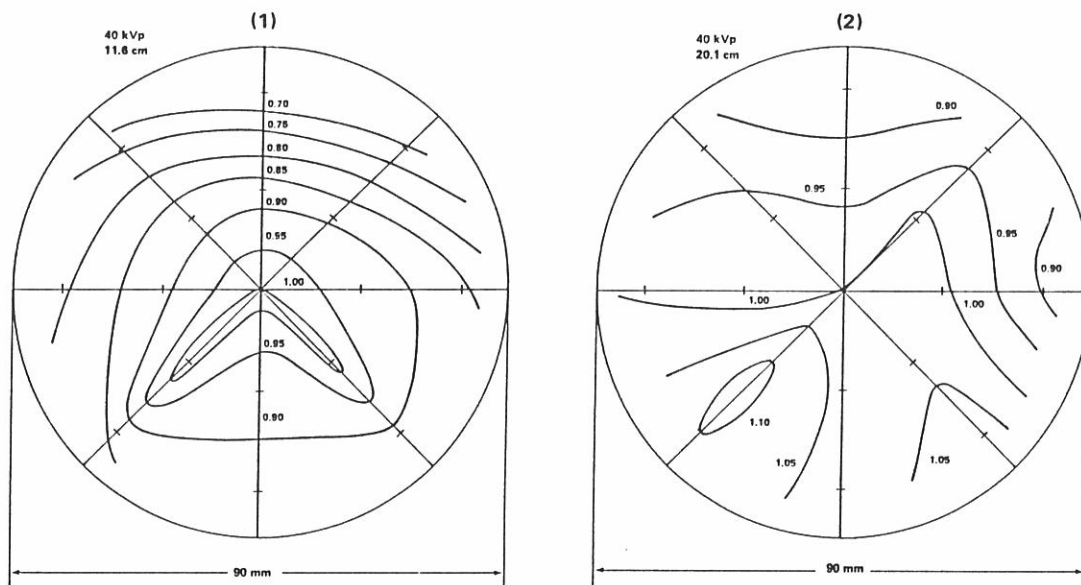
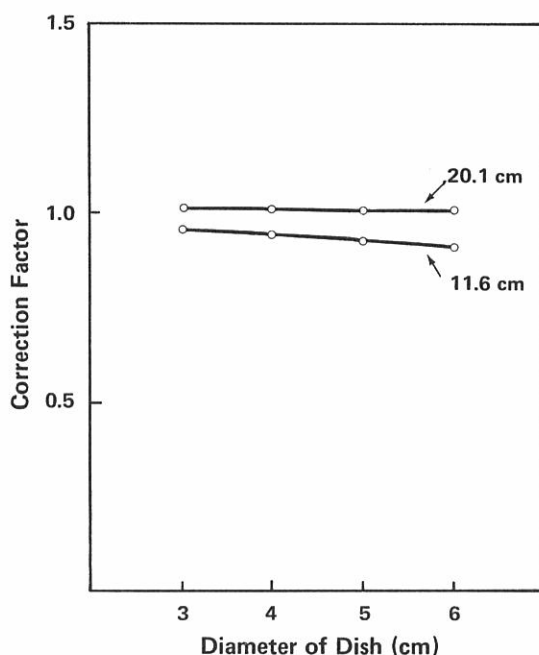


FIGURE 16 CORRECTION FACTOR FOR NONUNIFORMITY.
NORMALIZED TO THE CENTER

図16 非均一性のための補正係数. 中心に正規化



Cell Irradiation and Survival

The technical parameters used for cell irradiations are listed in Table 5. These factors were obtained from the dosimetry portion of this study in this section. The exposure dose rates at 11.6 cm and 20.1 cm shown in the fifth column differ by 2% to 4% from those shown in Table 2. These represent different measurements from those in Table 2. Since exposures were made afterwards, the dose measurements were repeated. These differences arise from changes in output of the X-ray tube and from errors in measurements. Four factors from the sixth to the ninth columns of Table 5 were multiplied by the exposure rate to obtain the dose rates in the tenth column. The actual doses were the products of the current (mA), the time (seconds), and the dose rate (Table 5). Figure 17 shows the survival of V79 cells which were irradiated by ^{60}Co gamma rays and 200 kVp X rays. The output doses of 200 kVp X rays and ^{60}Co gamma rays are shown in Table 5. The RBE was 1.3 at 10% survival. This is within a reasonable range.^{7,8} Figures 18-20 show V79 cell survival for the three types of soft X rays as shown in Table 5.

細胞照射及び生存率

細胞照射に用いた条件を表5に示す。これらの条件は、この項に述べた本調査の線量測定から決定した。第5コラムの11.6 cmと20.1 cmでの照射線量率は、表2に示したものと2%～4%異なる。これらは表2とは異なる測定を示している。照射は後に行われたので、線量測定を繰り返した。これらの差異は、X線管の放射線出力の変化及び測定における誤差によるものである。表5の第6～9コラムの四つの係数に照射線量率をかけ、第10コラムの吸収線量率を求めた。実際の吸収線量は電流 (mA)、時間 (秒)、線量率 (表5) の積である。 ^{60}Co ガンマ線及び200 kVp X線によって照射したV79細胞の生存率を図17に示す。200 kVp X線と ^{60}Co ガンマ線の放射線出力を表5に示す。10%の生存率におけるRBEは1.3であった。これは適当な範囲内である。^{7,8} 表5に示す3種類の軟X線についてのV79細胞の生存率を図18～20に示す。これら3種類の軟X線のRBEは

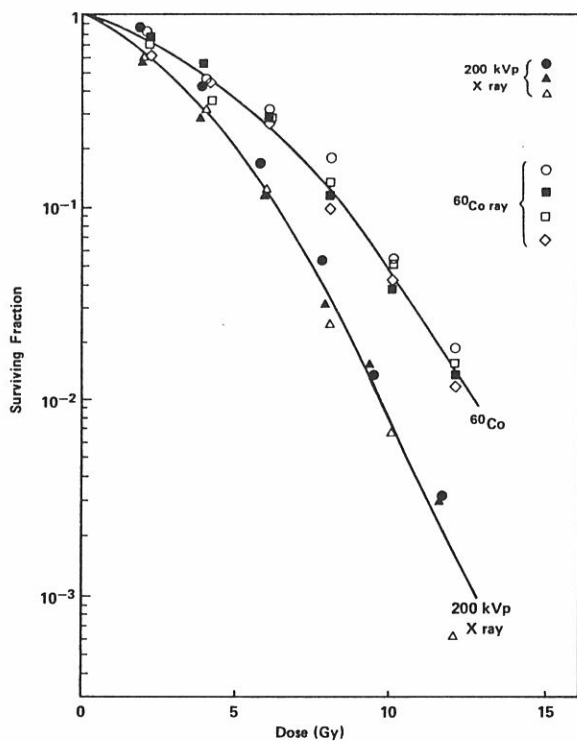
FIGURE 17 SURVIVAL OF V79 CELLS FOR ^{60}Co GAMMA RAYS AND 200 kVp X-RAYS図17 ^{60}Co ガンマ線と 200 kVp の X 線を用いた場合の V79細胞の生存率

FIGURE 18 SURVIVAL OF V79 CELLS FOR 40 kVp SOFT X RAYS WITHOUT Al FILTER

図18 Al フィルターは使用せず、40 kVp の軟 X 線を用いた場合の V79細胞の生存率

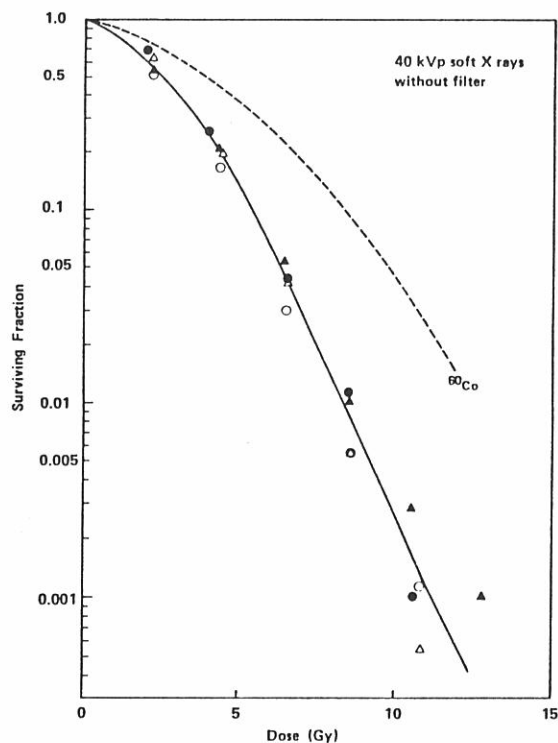


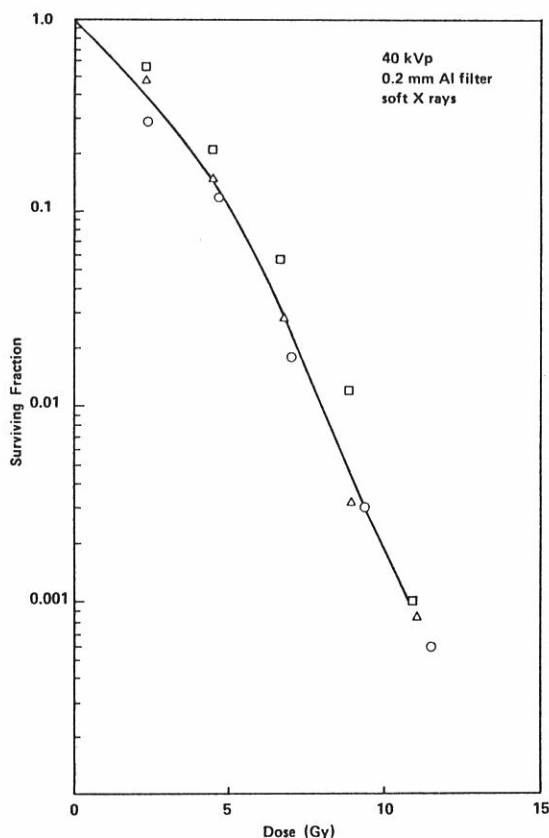
TABLE 5 IRRADIATION TECHNICAL FACTORS AND CORRECTION FACTORS

表 5 照射条件と補正係数

X rays & Gamma rays	Energy	Added Filter	Distance from the X-ray Tube or Source (cm)	Exposure Rate at the Center (R/mAs)	Timer correction	Uniformity Correction	Medium Absorption Correction	f-factor (rad/R)	Dose rate (rad/mAs)
Soft X rays	50 kVp	0.7 mmAl	11.6	0.97	1.00 ₄	0.93	0.90	0.915	0.75
Soft X rays	40 kVp	0.2 mmAl	20.1	1.00	1.00 ₄	1.00	0.71	0.915	0.65
Soft X rays	40 kVp	0	28.6	2.67	1.00 ₄	1.00	0.57	0.915	1.40
Orthovoltage X rays	200 kVp	0.5 mmAl + 1.0 mmCu	60.0	1.30	-	-	-	0.95	1.24
^{60}Co gamma rays	1.25 MeV	0	80.0	0.80	-	-	-	0.95	0.76

FIGURE 19 SURVIVAL OF V79 CELLS FOR 40 kVp,
0.2 mmAl FILTER SOFT X RAYS

図19 0.2 mmAl フィルター, 40 kVp の軟X線を用いた場合の V79細胞の生存率



RBEs for these three types of soft X rays were 1.6 at 10% survival, and they agreed within an acceptable experimental error.

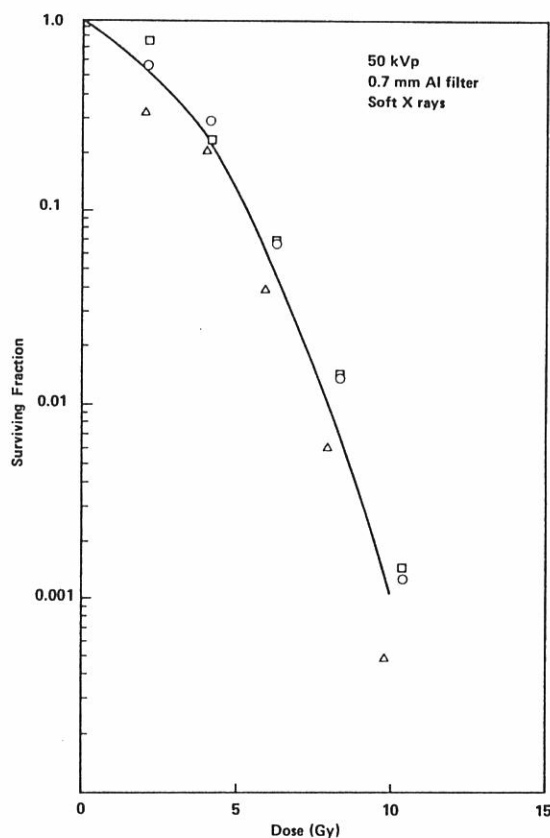
DISCUSSION

Dosimetry

The absolute exposure doses were 16%-29% higher than those stipulated by the SOFTEX Company. The factors used by the SOFTEX Company to make their determinations are unknown. Our results indicate that a difference of this magnitude may occur due to conditions used in measurement, such as the setup used, the time of exposure, current, etc. In addition, we must ascertain whether a suitable dosimeter was used. The cause of the discrepancy cannot be determined without such information. The measurements using the Nuclear Associates Type

FIGURE 20 SURVIVAL OF V79 CELLS FOR 50 kVp,
0.7 mmAl FILTER SOFT X RAYS

図20 0.7 mmAl フィルター, 50 kVp の軟X線を用いた場合の V79細胞の生存率



10%の生存率で1.6であり, 許容し得る実験誤差の範囲内で一致が認められた.

考 察

線量測定

絶対照射線量は SOFTEX 社が規定したものより 16%~29% 高かった. SOFTEX 社が測定で用いた照射条件は不明である. 我々の結果は, この程度の差異が, 使用した装置, 照射時間, 電流等の測定条件の違いによって起こり得ることを示している. 更に, 使用した線量計が適切であったか否かを確認しなければならない. これらの情報がなければ不一致の原因を究明することはできない. Nuclear

30-330 PTW chamber are reliable because the chamber was calibrated for low-energy X rays as shown in Table 1. The medium absorption as measured by this chamber is also reliable. Since TLD measurements can be made in the medium, the conditions are nearly identical to the actual ones, such as with backscatter. In this respect, results obtained using TLD detectors are regarded reliable. However, the sensitivity of TLD detectors at relatively low energies is unknown, and the TLD detectors have diameters of 1.2 mm. Thus, we could not determine exactly how much of the dose returned as backscatter from the plastic dish. In the medium absorption measurement, the TLD detectors were not covered sufficiently by the medium after the addition of small volumes such as 1 ml or 2 ml, since they have diameters of 1.2 mm (Figure 9). These points are higher than the curves shown in Figures 8(1) and 8(2).

There seems to be a nearly linear relationship between the X-ray tube voltage and the thermoluminescence tube voltages ranging from 30 to 50 kVp (Figure 6), and between tube voltages and exposures measured by the ionization chamber (Figure 6). For effective X-ray energy values higher than 12 keV, the response of TLD detectors (BeO) including absorption by glass capsules is relatively uniform (Figure 1). The ratios of thermoluminescence to the Nuclear Associates ionization chamber readings do not vary appreciably above 30 kVp (Figure 7). Values over 30 kVp are considered usable.

Since the exposures and medium absorptions measured by the Nuclear Associates ionization chamber are most reliable, doses should be determined using Table 2 as containing the basic values. There was good agreement of exposures with 4 and 8 ml medium between the chamber and the measuring TLD detector. This shows that backscatter of X rays was undetectable by TLD detectors.

In studying correlations between exposure times and exposures, attention should be paid to any changes in current which is usually unstable for several seconds during the early stage of each exposure. The difference was within $\pm 3\%$ from 0.5 to 10 sec (Figure 11). For exposures longer than 20 sec differences were small ($< 0.5\%$). Average values of the current were used as current readings during each exposure.

Associates 30-330 PTW型電離箱は表1に示すとおり低エネルギーX線について校正したものであるので、この電離箱を用いた測定は信頼できる。この電離箱によって測定した培地の吸収も信頼性が高い。TLD測定は培地内で行うことができるので、後方散乱等の状態は実際のものとほとんど同一である。この点では、TLD検出器を用いて得た結果は信頼性が高いと考えられる。しかし、比較的低いエネルギーでのTLD検出器の感度は不明であり、TLD検出器の直径は1.2 mmである。したがって、後方散乱としてどれだけの線量がプラスチック製培養皿から戻ってきたかを正確に調べることはできなかった。培地の吸収の測定においては、TLD検出器の直径が1.2 mmであるので、1 ml又は2 ml等、少量の培地を添加したときはTLD検出器が培地で十分に覆われなかった(図9)。これらの点は図8(1)及び8(2)で示した曲線より上方にある。

30~50 kVpの管電圧では、X線管電圧と熱ルミネッセンスとの間に(図6)、また管電圧と電離箱によって測定した照射線量との間に(図6)直線に近い関係があると考えられる。12 keVより高い実効X線エネルギー値については、ガラス製カプセルによる吸収等のTLD検出器(BeO)の反応は比較的均一であった(図1)。Nuclear Associatesの電離箱による測定値と熱ルミネッセンスとの比率は、30 kVp以上ではあまり変化しない(図7)。30 kVp以上の値が使用可能と考えられる。

Nuclear Associatesの電離箱によって測定した照射線量と培地の吸収が最も信頼性が高いので、基本的な値が含まれている表2を用いて線量を決定すべきである。4及び8 mlの培地を用いた場合、電離箱による測定値とTLDによる測定値にかなりの一致が認められた。このことは、X線の後方散乱がTLD検出器によっては探知されなかったことを示している。

各照射の初期には電流は通常数秒間は不安定であるので、照射時間と照射線量との相関関係を調べるためには、電流の変化に留意しなければならない。0.5~10秒ではその差異は $\pm 3\%$ 以内であった(図11)。20秒以上の照射では、差は小さかった($< 0.5\%$)。各照射における電流の記録としては、電流の平均値を用いた。

Dose distributions measured by the Exradin ionization chamber anteriorly and posteriorly, and to the left and right, each at a distance of 20.1 cm, are shown in Figures 14 and 15. The sites of measurements are shown in Figure 13 (1). These results indicate that, compared to the center, the decrease in dose was small (<5%), on the left, the right, and anteriorly, but the decrease in dose posteriorly was greater than 15%. The greater decrease posteriorly was due to the anode effect.⁹

The dose distributions as shown in Figure 15 indicate that 1) the dose distribution has a greater decrease posteriorly, 2) the uniformity of dose distribution at a distance of 20.1 cm was satisfactory, the distribution being 90%-105%, and 3) the nonuniformity of dose distribution at a distance of 11.6 cm was more than 10%. When dishes with the smallest diameters (3 cm) were used, distributions within 90% were obtained. Correction factors for these distributions are shown in Figure 16 at distances of 20.1 and 11.6 cm. These factors are ratios of the averages to the exposures at the center, and should be multiplied by the beam center exposures which are shown in Table 2. Comparing various laboratory studies of effects of exposure of biological materials to ionizing radiation requires knowledge of precise output of the irradiating source. Accurate dosimetry of low-energy X rays from a SOFTEX apparatus is difficult. However, exposures per mAs for each irradiation can be obtained from the values shown in Table 2 by correcting for medium absorption (Figure 8), time of exposure (Figure 11), tube current (Figure 12), and correction factors for nonuniformity (Figure 16). Absorbed dose per mAs should be calculated from the exposure by multiplying f-factors in Table 3. Exposures and doses are obtained by multiplying exposure time and current. This process is shown in Table 5. The best estimates will be made in this way. Accurate dosimetry is of paramount importance in understanding radiation effects on biological material by ionizing radiations of different energies.

Cell Survival

The RBE of 180 kVp X rays as compared to ⁶⁰Co gamma rays for cultured mammalian cells (L5178Y) has been reported to be 1.30.¹⁰ The value obtained here is essentially the same as RBE values of soft X rays which were

各々20.1cmの距離で、Exradinの電離箱によって測定した前方及び後方、また左側及び右側への線量分布を図14及び15に示し、図13(1)に測定位置を示す。これらの結果は、中心に比べ、左側、右側、前方では線量の減少が小さいが(<5%)、後方では線量の減少が15%より大きかったことを示している。後方の減少が大きかったのは、陽極効果によるものである。⁹

図15に示す線量分布によれば、1) 線量分布が後方で大きく減少すること、2) 20.1cmの距離での線量分布は90%~105%であり、均一性は十分であったこと、3) 11.6cmの距離での線量分布の非均一性は10%より大きかったことを示している。直径が最も小さい(3cm)培養皿を用いたときには、90%以内の分布が得られた。20.1cm及び11.6cmの距離でのこれらの分布の補正係数を図16に示す。この係数は中心における照射線量に対する平均値の割合で、表2に示した中心における線量率を乗じるべきである。生物学的材料に対する電離放射線照射の影響に関する様々な研究室での研究を比較するためには、照射源の正確な放射線出力を知ることが必要である。SOFTEX装置からの低エネルギーX線の線量を正確に測定することは困難である。しかし、培地の吸収(図8)、照射時間(図11)、管電流(図12)、非均一性の補正係数(図16)について補正を行うことにより、表2に示す値から各照射のmAs当たりの照射線量を求めることができる。照射線量と表3のf係数とを乗じることにより、mAs当たりの吸収線量を計算しなければならない。照射時間及び電流を乗じることにより照射線量と線量を求める。この手順を表5に示す。このような方法で最良の推定値が求められる。生物学的材料に対する様々なエネルギーの電離放射線の影響を理解するためには、正確な線量測定は最も重要である。

細胞生存率

哺乳動物の培養細胞(L5178Y)について、⁶⁰Coガンマ線と比較した180 kVpのX線のRBEは1.30と報告されている。¹⁰ 本研究で求めた値はHeLa-S3細胞についてZeitsら⁷が求めた軟X線のRBE値と基本的

obtained by Zeits et al⁷ for HeLa-S3 cells. They used 20.4 keV and 23.2 keV effective energy X rays and compared them with ⁶⁰Co gamma rays. The RBE values obtained ranged from 1.25 to 1.29. Our corresponding values were 1.6. Goodhead² studied V79 hamster cells using 4.55 keV Ti K X rays. The RBE compared to hard X rays was 1.7. Our value compared to hard X rays was 1.3, so the RBE values for this could be useful values to correlate RBEs for soft and hard X rays.

に同じである。彼らは20.4 keVと23.2 keVの実効エネルギーX線を用いて、⁶⁰Coガンマ線との比較を行った。得られたRBE値は1.25～1.29であった。それに対応する我々の値は1.6であった。Goodhead²は4.55 keVのTi K X線を用いてV79ハムスター細胞について調査した。硬X線と比較したRBEは1.7であった。硬X線と比較した我々の値は1.3であったので、このRBE値は、軟及び硬X線のRBEの相関関係を調べるために役立つと思われる。

REFERENCES

参考文献

1. BAN S, IIDA S, SHIMBA H, AWA AA, HAMILTON HB, CLIFTON KH: Soft X-rays for radiobiological studies. RERF TR 10-82
2. GOODHEAD DT: An assessment of the role of microdosimetry in radiobiology. Radiat Res 91:45-76, 1982
3. OGAWA M, WADA T, KATO K, HOSHI M, SAWADA S: The temperature characteristics of a Mix-DP phantom and temperature correction factors for JARP dosimeter. Jpn Radiol Physics 5:9-15, 1985
4. YAMAMOTO S: TLD. Nuclear Engineering 29:37-9, 45, 1981
5. NATIONAL ELECTRIC COMPANY, INC. TECHNICAL REPORT: Thermoluminescence dosimeter. National TLD tips. Inazu-cho 3-1-1, Toyonaka, Osaka 561
6. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU) Report 17, 1970
7. ZEITZ L, KIM SH, KIM JH, DETKO JF: Determination of relative biological effectiveness (RBE) of soft X-rays. Radiat Res 70:552-63, 1977
8. BONURA T, YOUNGS DA, SMITH KC: R.b.e. of 50 kVp X-rays and 660 keV γ -rays (¹³⁷Cs) with respect to the production of DNA damage, repair and cell-killing in *Escherichia coli* K-12. Int J Radiat Biol 28:539-48, 1975
9. ANTOKU S, SAWADA S, RUSSELL WJ, WAKABAYASHI T, MIZUNO M, SUGA Y: Radiation quality and anode effect in diagnostic roentgenography in Hiroshima and Nagasaki. Health Phys 24:611-7, 1973 (ABCC TR 26-67)
10. ANTOKU S: RBE of pulsed radiations by lethality in mice: Cultured mammalian cells and bacteria. Radiat Res 51:696-704, 1972