

JAERI-M

5608

γ 線, 電子線に対するCTAフィルム
線量計の線量校正

1974年3月

田中隆一・四本圭一・田島 訓
河合視巳人・水橋 清・景山英一

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、お申しこしてください。

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.

γ 線，電子線に対するCTAフィルム線量計の線量校正

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

田中 隆一，四本 圭一，田島 訓

河合視巳人，水橋 清，景山 英一

(1974年2月7日受理)

Megarad 領域における ^{60}Co γ 線と 1.5 MeV電子線に対するCTA (三酢酸セルロース) フィルム線量計の校正をそれぞれ2つの方法で試みた。 γ 線に対しては電離箱とフリッケ線量で校正した。電子線に対してはCTAバルク内の相対的な深部線量曲線の積分値を，ビーム電流測定法とカロリメトリーで決定されたエネルギー・フルエンスで規格化することによって校正した。 γ 線，電子線の両方に対して2つの方法による測定結果は，定数の不確定さや実験誤差の範囲ではよい一致をみた。しかし校正定数は γ 線，電子線の間では異なっており，線量率依存性があることがわかった。測定結果に対するいくつかの補正およびそれに関連する不確定要因についても議論された。

Calibration of the CTA Film Dosimeter for
 ^{60}Co Gamma-rays and Electron Beam

Ryuichi TANAKA, Keiichi YOTUMOTO,
Satoshi TAJIMA, Mikito KAWAI,
Kiyoshi MIZUHASHI and Eiichi KAGEYAMA

Pilot Scale Testing Station, Takasaki, JAERI

(Received February 7, 1974)

The CTA (cellulose triacetate) dosimeter has been calibrated for both ^{60}Co gamma-rays and 1.5 MeV electron beam in the mega-rad region. The calibration for gamma-rays is by two methods, i.e. with ionization chamber or Fricke dosimeter. Agreement between the two methods is good within experiment uncertainty. For electron beam the calibration is by relative depth dose curve in CTA normalized by the energy fluence determined by two method, i.e. beam current measurement or calorimetry. The results are also in good agreement. The calibration constant differs between gamma-rays and electron beam, which indicate the response of a CTA dosimeter is dependent on the dose rate. Corrections for the gamma-rays exposure rate and the electron beam intensity and the uncertainty in their values are also discussed.

目 次

1. ま え が き	1
2. γ 線に対する線量較正	2
2.1 照射のジオメトリー	2
2.2 平行平板型電離箱の線量較正	2
2.3 平行平板型電離箱による測定への補正	5
2.4 フリック線量計による測定	6
2.5 照射線量率の評価	9
2.6 CTAフィルム線量計の較正	11
3. 電子線に対する線量較正	15
3.1 線 源	15
3.2 電子線強度の測定法	15
3.2.1 電子エネルギーの較正	16
3.2.2 電子流密度の測定	16
3.2.3 カロリメトリー	20
3.3 電子線強度の評価	20
3.4 CTAフィルム線量計の較正	23
3.4.1 固定照射の場合	23
3.4.2 移動照射の場合	25
4. あと が き	29

1. ま え が き

γ 線，電子線に対する大線量線の測定には，すでに多くの実用的な測定法が開発されているが，これらの線量計の較正法については今まで十分信頼できる方法が確立されておらず，種々の補正ファクターについても十分な配慮がなされていない場合が多い。その理由としては次の2つのことが考えられる。

第1の理由は大線量照射が今までは概して試験研究的段階にあり，低線量領域におけるような一般的普及が進んでいなかったため，較正法の確立がそれほど要求されなかったことである。しかし現在では，放射線化学，食品照射，放射線殺菌の応用など大線量照射法も実用的段階に入ってきているので，大線量測定はますます重要になっており，線量較正法の確立は急務となってきた。

第2の理由は大線量領域の一次線量測定法は，主として医学的，生物学的利用を対象とする低線量領域で確立した方法の延長上にあるとはいえ，具体的な形で標準化されるまでに至っていないことである。ICRU勧告¹⁾によって2次標準と評価されたフリック線量計にしても， 10^5 rad/hr 程度以上の大線量測定に対しては測定値の信頼性は悪くなると考えなくてはならない。大線量照射用電子線加速器を用いた線量較正に対しては，電離箱やフリック線量計がかならずしも使用できないこと，照射強度の再現性が γ 線の場合よりも劣ること，加えて大線量率照射に伴う種々の物理的効果のために，大きな測定誤差が生じやすく，測定精度の評価も非常に面倒である。

以上のことを考慮すると，標準測定法が確立されていない現状では，たとえ較正にかかわる不確定さを十分定量的に評価できないにしても，さしあたって信頼性の高いと考えられる複数の異なる方法によって得られた結果が，どの程度一致するかをチェックすることによって，それらの方法の信頼度のレベルを検討してみる必要があると思われる。しかし実際には実用線量計の較正に対してこのような試みは今までほとんど行われていない。

われわれは線量較正法の確立への一つの試みとしてCTA（三酢酸セルロース）フィルム線量計²⁾の ^{60}Co γ 線，電子線に対する較正を行なった。 ^{60}Co γ 線に対しては電離箱とフリック線量計を，電子線（1.5～2 MeV）に対してはビーム電流測定法とカロリメトリーを用いて較正を行ない，それぞれの場合について2つの較正法による結果を比較検討し，いくつかの問題点を提起した。

CTA線量計は最初CAPRI*において開発され，その後1971年度より日仏研究協力の一環としてCAPRIおよび高崎研究所において開発研究が続行されている。本研究は1972年から1973年にかけて行なわれたものであり，線量較正の必要性はCTA線量計の特性を調べる目的からも要請されたものである。

* CAPRI Centre d'Application et de Promotion des Rayonnements Ionisants.

2. γ 線に対する線量較正

γ 線に対する線量決定法については近年になってかなり各種のデータがそろい、それらは1969年のICRU Report 14³⁾に詳しくまとめられている。しかしながらこの報告書の基礎になっているデータは大部分医学あるいは生物学的分野で利用している低線量率領域(だいたい 10^4 R/h以下)でのものであり、工業用の大線源に対してはそのまま適用できないものが多い。この領域で使用されている実用線量計の較正は、適当なファントム物質中の一定の深さに実用線量計と標準測定用の電離箱プローブを挿入し、両者の測定値の比較から行なうことが推奨されている。しかし今回は $10^5 \sim 3 \times 10^6$ R/hの照射線量率(exposure rate)をもつ空間点で電離箱とフリッケ線量計による測定値を比較する目的もあるので、ファントムを用いず照射野の空間に7つの標準測定点を設けて、二つの方法から照射線量率を求めた。以下に電離箱とフリッケ線量測定の方法、測定結果の比較、考察および較正結果について述べる。

2.1 照射のジオメトリー

電離箱、フリッケ線量計およびCTAフィルムの照射の幾何学的配置の断面図および ^{60}Co 線源の形状をFig. 1に示す。線源には高さ30 cm、巾35 cmの95800 Ciの板状線源(ペンシル20本、5ケース)を用いた。線源格納は線源昇降装置による水中格納方式で行なっている。照射室の大きさは、 $4.4 \times 5.6 \times 4.4$ m(高さ)、線源中心から床面までの距離は64 cmであった。測定具は 1.8×1.2 mの広さ、5 mmの厚さのステンレス製の照射台の上に置かれた。照射台にはサンプルホルダーが固定できる目盛つきのスライダーを取り付け、電離箱、フリッケ線量計測定用の試験管、CTAフィルムホルダーから線源への距離の再現性が正確に保たれるようにした。各線量計の中心の高さは線源の中心と一致するように照射台上15 cmの高さにセットした。電離箱とフリッケ線量計の比較測定、およびCTA線量計の較正のため、 $10^5 \sim 3 \times 10^6$ R/hまでの照射線量率にわたって7つの標準測定点をスライダーの上に定めた。測定用サンプル中の平均強度の減衰、線源昇降時の実効照射時間に対する補正については2.4で述べる。

2.2 平行平板電離箱の線量較正

10^4 R/h以上の高線量率領域での照射線量率の決定には現在標準測定器が存在していないが、一般的に高線量率に対しては電圧飽和特性が悪くなるので円筒型よりも平行平板型のものが良いとされている⁴⁾。本実験では電極プレート間距離、約1 mm(開放型)、集電極直径20 mmの平行平板電離箱を用いた(Fig. 2)。壁材にはグラファイトが望ましいが、加工性、ガス吸着性などを考慮してアルミニウムを用いた。電極プレート間距離が薄いため、電離容積(約0.33 cc)の正確な決定が困難であることから、それによる測定誤差を除くために、適当な標準電離箱による較正を行なうことにした。

較正には電子技術総合研究所にある標準電離箱(円筒型、グラファイト壁、電離容積6.25 cc、

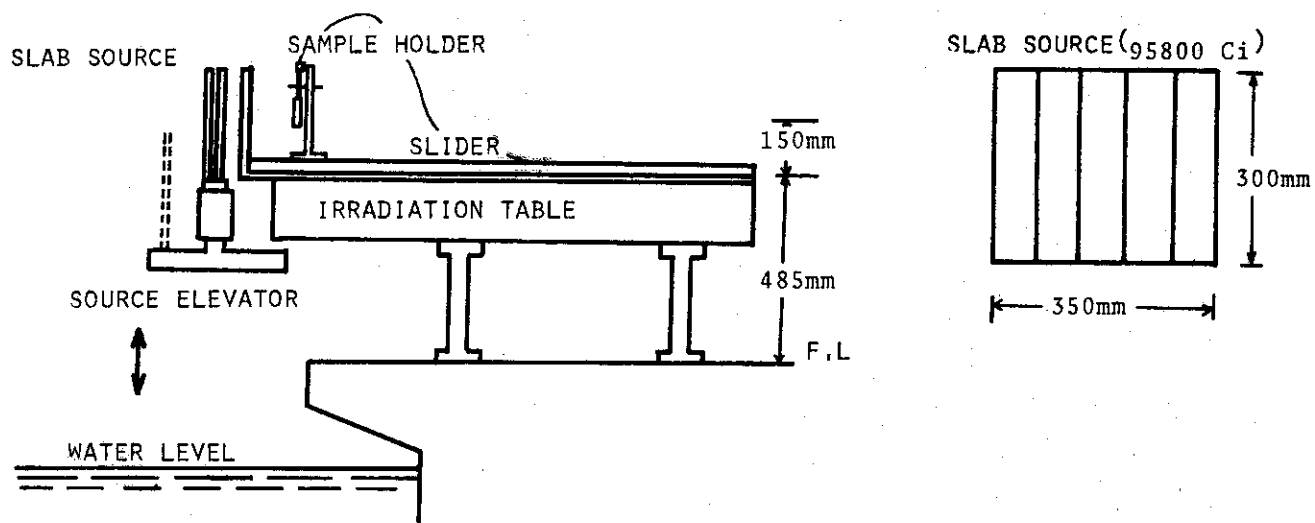


Fig. 1. Geometrical Arrangement of Gamma-ray Irradiation

A: STANDARD CHAMBER (CYLINDRICAL, ELECTROTECH, LAB.)
 B: REFERENCE CHAMBER (PARALLEL PLATE, JAERI)

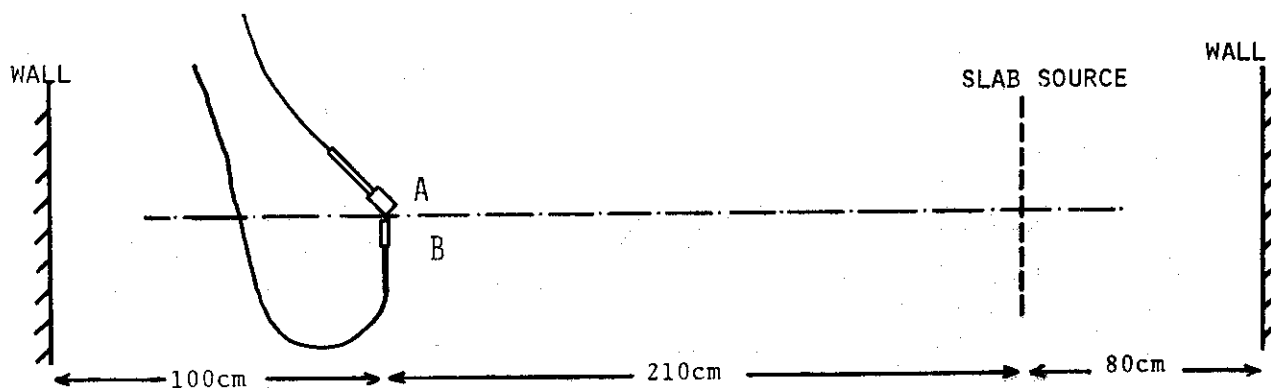


Fig. 3. Arrangement of the Exposure Calibration for Ionization Chamber

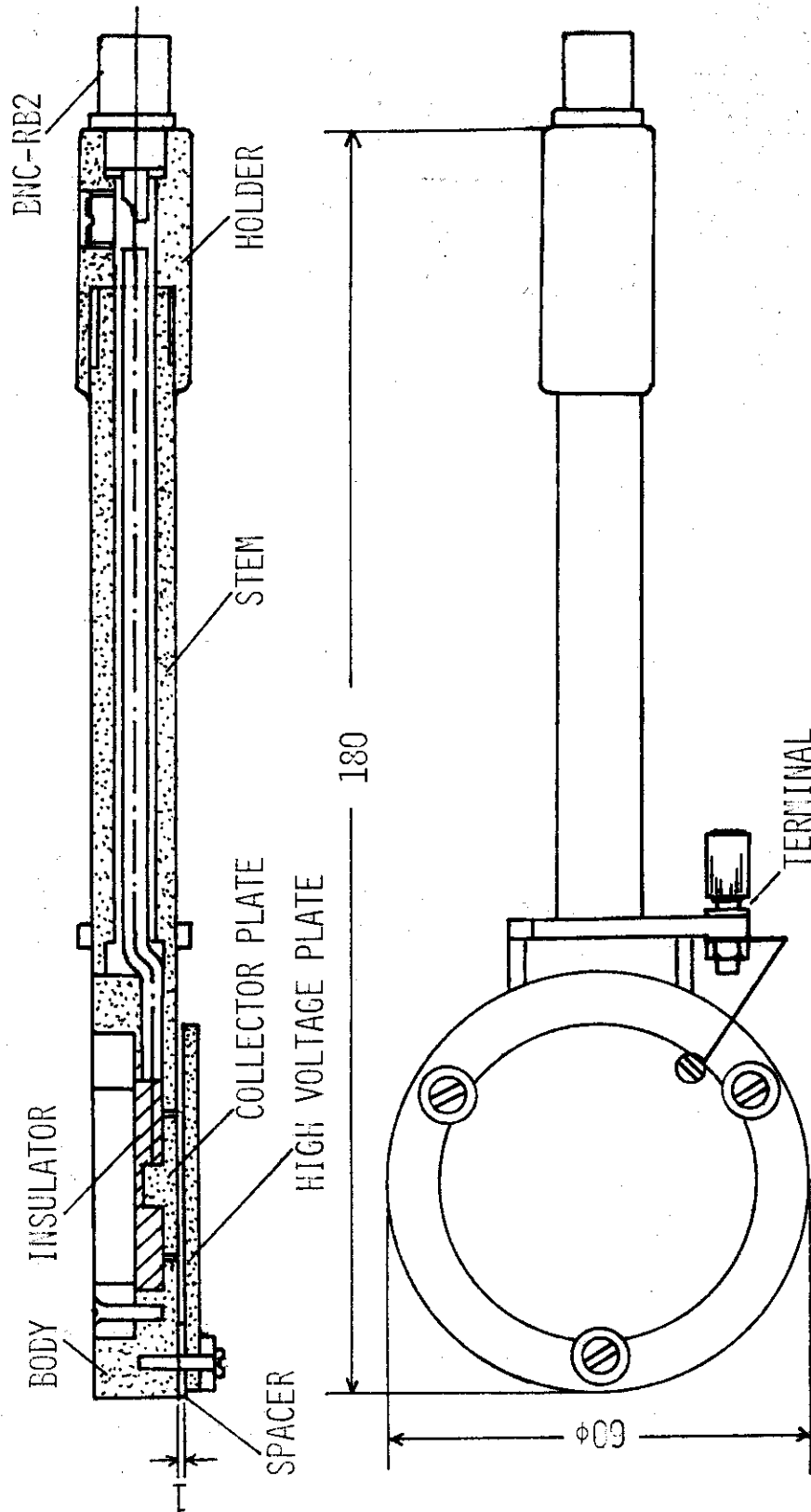


Fig. 2. Sectional View of the Parallel-Plate Ionization Chamber

Accuracy $\pm 1\%$) を用い、 $10^3 \sim 10^4$ R/h の範囲で両者の測定値を比較した。較正のための幾何学的配置を Fig. 3 に示す。平行平板型電離箱と標準電離箱を板状線源から 210 cm 離れた床上 1 m の位置に図のように配置した。標準電離箱は線源に対し 45 度に傾けて固定した。両電離箱の感受部分の中心を結ぶ線分 (10 cm) は板状線源に平行に並べ、その垂直二等分線が線源の中心を通るように合せた。線源には長さ 30 cm のペンシル状線源 5 本を入れた線源ケース (横巾 7.5 cm, 3500 Ci) を最大 9 個板状に並べたものを用いた。線源ケースの配置の仕方は前述の垂直二等分線に対して対称となるように 1 個, 2 個, 3 個, 5 個, 7 個, 9 個の順に線源ケースの数を増していき、測定点での線量率を変えられるようにした。この方法によって、両電離箱によって測定された照射線量率を常に同一に保った。

電離電流測定には Keithley 602 Electrometer を用いた。標準電離箱には最大 500 V まで印加したが、電離電流の飽和が十分でないので、Greening の外挿法から飽和電流値を求めた。平行平板電離箱では 30 V で十分飽和に達するので、飽和電流値には測定値をそのまま用いた。また飽和電流値には、極性効果 (正負の印加電圧に対して異なった値を示す) が観測された⁵⁾ が、その差異はほとんどケーブルの stem current によって説明できるので、正しい飽和電流値としては正負の飽和値の平均値を採用すれば良いことがわかった。(標準電離箱についても同様な方法で決定した。) 以上の方法による測定の結果、 $10^3 \sim 10^4$ R/h の範囲の 6 つの異なる線量率における標準電離箱に対する平行平板電離箱の飽和電流の比は、一定の圧力、温度のもとでだいたい $\pm 1\%$ 以内で一定であり、かつこの比は線量率の大きさに依存するよう傾向は見られなかった。

2.3 平行平板電離箱による測定に対する補正

平行平板電離箱に対する飽和電離電流値 i_s と照射線量率との関係は次式から与えられる。

$$\dot{X} = 3600 i_s K \frac{1}{v} (1 + \delta) \frac{M \tilde{S}_m}{a \tilde{S}_m} \cdot \frac{a \tilde{\mu}_{en}}{M \tilde{\mu}_{en}} \cdot K_a \quad (\text{R/h}) \quad (1)$$

ここで K は Amp \rightarrow esu の換算定数、 v は電離容積 (cc)、 $1 + \delta$ は壁材による減衰補正項、 $M \tilde{S}_m$ 、 $a \tilde{S}_m$ はそれぞれ壁材と空気の質量阻止能、 $M \tilde{\mu}_{en}$ 、 $a \tilde{\mu}_{en}$ はそれぞれ壁材と空気の質量エネルギー吸収係数、 K_a は大気補正係数 ($= 760 \times T / 273 \times P$, T : 温度 (K°), P : 気圧 (Torr)) である。

本実験における照射線量率の評価にあたって、平行平板電離箱は前述の通り標準電離箱で較正されているので、(1)式の定数項のうち考慮すべきものは、較正時と異なるもの、すなわち、①大気補正係数、②壁材による減衰補正項、③壁の質量エネルギー吸収係数の 3 つである。

②の補正は線量率の較正を行なったときの減衰補正項とのずれに対してのみ考慮すればよい。その理由は、板状線源に対する照射野では、板からの距離によって γ 線の平均入射角度が異なるため、壁中の γ 線の path length も変化するからである。

③の補正は散乱 γ 線の含有率が線量較正時の場合と異なる可能性があることを考慮するためのものである。これはグラフィイトや空気よりもかなり原子番号の高いアルミニウムを壁材と

しているために生じる。Ritz and Attix の同様な電離箱の測定においては、アルミニウムの質量エネルギー吸収係数に対する散乱線の影響は無視できることを確かめられている⁶⁾ので、今回の測定では③の補正は無視することにした。しかし、実際にはわれわれのジオメトリーは Ritz and Attix の場合と異なっており、かつ同じ照射室でも散乱 γ 線の含有率は線源からの距離に依存すると考えられる。これらについてはまだ定量的な評価がなされていない。

2.4 フリック線量計による測定

各標準測定点におけるフリック線量測定の際の諸条件を Table 1 に示す。照射線量は次式で与えられる。

$$X = \frac{0.965 \times 10^9 \cdot \Delta OD}{\epsilon d \rho G (F_e^{3+}) \cdot f} \quad (R) \quad (2)$$

ここで、 ΔOD は照射によるフリック溶液の吸光度変化、 ϵ は 304 mm における第 2 鉄イオンの分子吸収係数 ($l/mol \cdot cm$)、 d は試料の巾 ($= 1 cm$)、 ρ はフリック溶液の密度、 $G (F_e^{3+})$ の値は Allen らの^{7), 8)} 結果 ($= 8.2$) を用いた。分子吸収係数に対する温度係数には 0.8 %/°C を用いた。 f は吸収線量 (rad) から照射線量 (R) への変換定数であり、 $f = 0.869 \times f \mu_{en} / a \mu_{en}$ ($f \mu_{en}, a \mu_{en}$ はそれぞれ 1.25 MeV の γ 線に対するフリック溶液と空気の質量エネルギー吸収係数) から 0.961 と決定した。 $f \mu_{en}$ はフリック溶液の全組成元素にわたる重荷重平均として計算した。

各標準測定点での照射線量率 \dot{X} は (2) 式の X を用いて次式で与えられる。

$$\dot{X} = \frac{f_a f_t X}{t} \quad (3)$$

ここで、 t は照射時間、 f_a はフリック溶液を封入した照射用試験管に対する一次 γ 線の減衰補正係数、 f_t は照射時間として扱われていない線源の昇降時に受ける線量に対する補正係数である。

f_a は Fig. 4 に示すような照射法において試験管による一次 γ 線強度の平均減衰値に対する試験管が存在していない空間での強度の比として計算して求めた。計算手順はまず試験管断面に平行に入射する γ 線に対してガラスとフリック溶液の平均減衰率を計算し、試験管中心における水平面に対して角度 θ で斜めに入射する成分に対する補正項を、板状線源の各小区分からの強度寄与分を考慮した $\cos \theta^{-1}$ の全平均値として求め、全平均の減衰率を導いた。減衰補正係数は各標準測定点ごとに決定したが、線源に最も近い点 (10 cm) で 1.066、最も遠い点 (90 cm) で 1.055 となった。

f_t は、各標準測定点で線源昇降時に受ける全照射線量を線源が上昇しきった点での照射線量率で割った実効照射時間を Δt とすると、 $f_t = t - \Delta t / t$ として与えられる。 Δt はシリコン接合型固体電離箱⁹⁾ による実測から決定された。線源から 85 cm の点における実測例を Fig. 5 に示す。

$\text{F}_e(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (REAGENT GRADE)	0.04 MOL
H_2SO_4	0.4 MOL
NaCl	0.001 MOL
DENSITY OF THE FRICKE SOLUTION	1.025 g/cm ²
WATER PURIFICATION:	TRIPLE DISTILLATION (NITROGEN SATURATED)
WAVE LENGTH	304 nm
G-VALUE ($\text{F}_e^{2+} \rightarrow \text{F}_e^{3+}$)	8.2
MOLAR EXTINCTION COEFFICIENT	2220 (25.5°C)
CONVERSION FACTOR	0.965
IRRADIATION TIME	30 - 60 MIN
IRRADIATION CELL	
OUTSIDE DIAMETER	16 MM ϕ
INSIDE DIAMETER	13 MM ϕ
LENGTH	80,150 cm

Table. 1. Various Characteristics of Fricke Dosimeter.

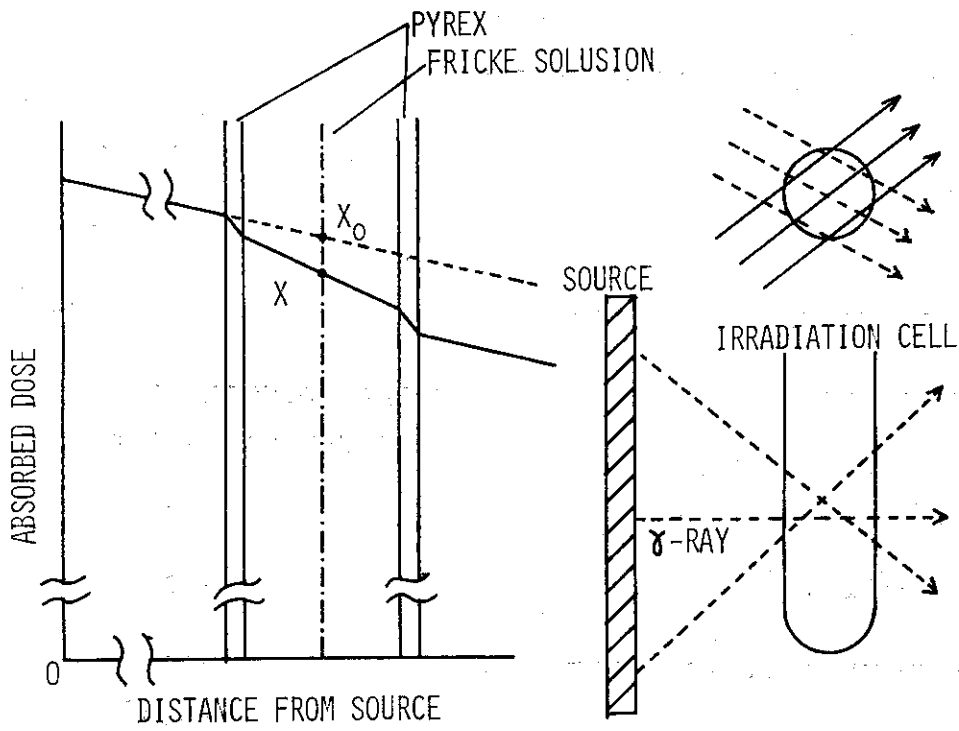


Fig. 4. Attenuation of Gamma-rays in the Fricke Dosimeter

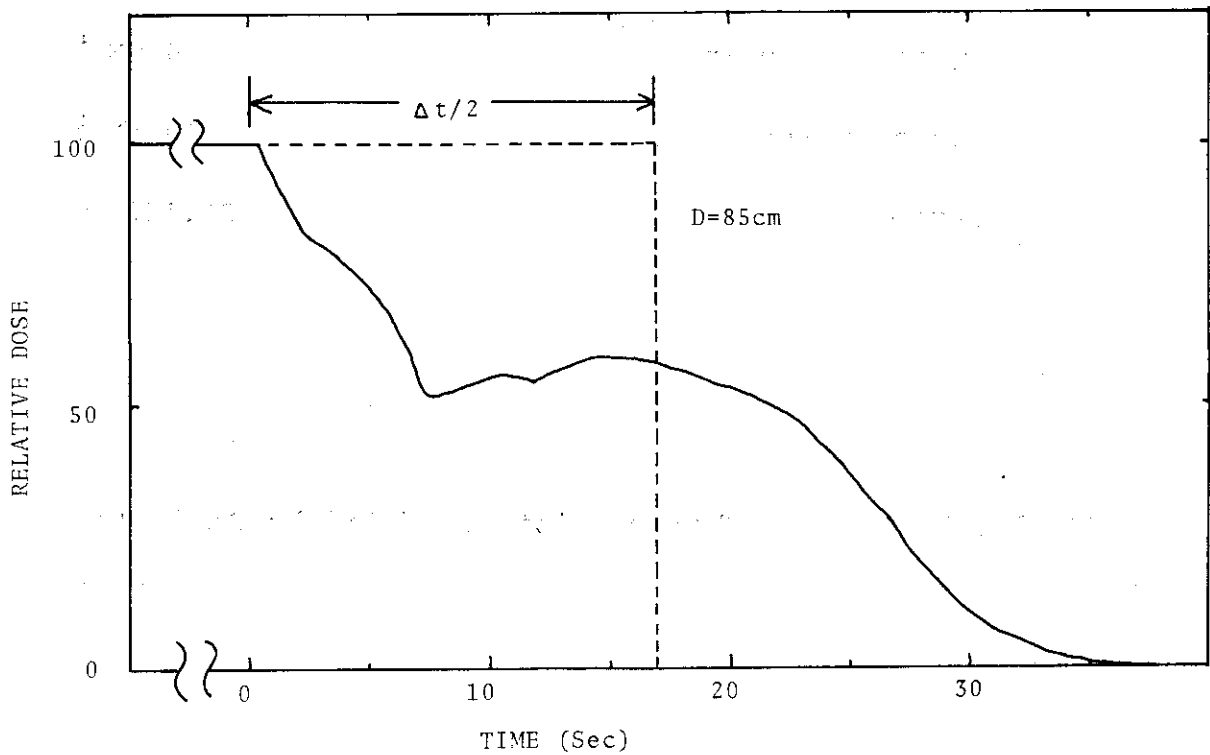


Fig. 5. Effective Irradiation Time for the Source Elevation.

試験管のタテ方向の強度分布に対する補正は、実測の結果均一であることがわかったので無視した。各標準測定点での線量率は2個の試料から得られた値の平均値をとった。また複数個の標準照射点に同時に試料を並べて照射すると、線源に遠い側の試料は近い側にある試料による遮蔽を受けるため、正しい照射線量率が得られないので、各点で別々に照射した。

2.5 照射線量率の評価

フリック線量計による測定結果を Table 2 に示す。電離箱の測定結果、およびフリック線量計による結果との比較を Table 3 に示す。両者の結果は全体的によく一致していると言えるが、 4×10^5 R/h 以下の低線量率ではフリック線量計による測定値が電離箱による測定値よりもすこし高くなる傾向を示している。ただし、これは多数回の実験によって十分に確認された傾向ではないので、この結果のみから一致の良さを過大視したり、あるいは低線量率側でフリック線量計が電離箱より高い測定値を与える原因の詳細な追求をしたりすることは避けた方がよいと考えられる。

線量率評価における精度や確度に関する問題点を以下に列記する。

- (1) 窒素飽和条件下での $G(F_3^+)$ 値は酸素飽和条件に比べて実験例が少い。したがって 8.2 の値の不確定さは酸素飽和条件の場合⁵⁾と同様に扱えば、少くとも $\pm 1 \sim 2\%$ はあるとみなければならぬ。それ以外の定数の不確定さも含めると、Accuracy と Precision (相対誤差) を合せた全体的な精度として $\pm 4 \sim 5\%$ は許容しなくてはならない。
- (2) 10^6 R/hr 以上の標準測定点では、30分照射でも $F_2^{2+} \rightarrow F_3^+$ の変換率はかなり高くなり、線量に対して飽和の傾向が現われ始める可能性がある。しかし、 10^6 R/hr 以上でフリック線量計による測定値が電離箱よりも低めになっている傾向は特に見出されなかった。
- (3) 試験管の器壁近傍での2次電子密度の不均一性による影響は一般化された cavity theory からだいたい評価できるが、本実験のジオメトリーでは1%以下とみなせる。
- (4) 電離箱による測定の不確定さとしては標準電離箱の絶対精度 ($\sim \pm 1\%$)、較正に関わる誤差 ($\sim \pm 1\%$)、大気補正係数の精度 ($< 1\%$) などがある。これらに加えて、 $10^5 \sim 10^6$ R/hrでの測定値は $10^3 \sim 10^4$ R/hrでの線量較正值からの外挿により求めているが、電離箱測定に関わる大線量領域特有の誤差要因が十分解明されていない現状では、単純な外挿には誤差が含まれている可能性がある。
- (5) 2.3で述べたように散乱γ線の含有率が電離箱の線量較正の時と異なる場合には、照射線量率の評価において壁材(アルミニウム)の質量エネルギー吸収係数の不確定さとなって現われる。この含有率は線源からの距離が遠いところほど大きくなると考えられるので、線量率の低くなるほど相対的に電離箱の測定値は高くなる。
- (6) 標準測定点で線量計を置く場合の線源からの距離の精度は ± 1 mm以下と考えられるが、これによる線量の誤差は10 cmの点で約1%、90 cmで約0.3%程度であり、重要な誤差要因にはならない。

以上の種々の不確定さを生む要因は現在十分に定量的に評価できないものが多い。全体の不確定さ(許容誤差)を個々の成分の2乗和の平方根として与えれば、フリック線量計と電離箱

Table. 2. Experimental results of Fricke dosimetry.

DISTANCE FROM SOURCE (cm)	EXPOSURE RATE (MR/hr)	CORRECTION FACTOR; f_t^*	CORRECTION FACTOR; f_a^*	CORRECTED EXPOSURE RATE (MR/hr)
10	3.285	0.992	1.066	3.46
15	2.175	0.990	1.061	2.28
20	1.571	0.989	1.059	1.645
30	0.873	0.993	1.057	0.916
45	0.462	0.991	1.056	0.483
65	0.251	0.990	1.056	0.262
90	0.138	0.989	1.055	0.144

* f_t : The correction factor for irradiation time

f_a : The correction factor for attenuation

Table. 3. Experimental results of Ionization Chamber and comparison with the results of Fricke dosimetry.

DISTANCE FROM SOURCE (cm)	EXPERIMENTAL VALUE (MR/hr)	CORRECTION FACTOR; F_{att}	CORRECTED VALUE	FRICKE DOSIMETRY (MR/hr)	FRICKE/ION CH.
10	3.405	1.015	3.46	3.46	1.00
15	2.31	1.009	2.33	2.28	0.979
20	1.642	1.006	1.65	1.64	0.996
30	0.924	1.003	0.927	0.916	0.988
45	0.476	1.001	0.476	0.483	1.015
65	0.251	1.001	0.251	0.262	1.043
90	0.138	1.000	0.138	0.144	1.044

* F_{att} : The correction factor for attenuation

との測定値の差は全体的な許容誤差の範囲内に十分含まれる。低線量率側で両者の比がずれてくる傾向は有意性があるとしても、(5)に述べた要因に帰するには大きすぎるので、今後この再現性を調べた上でさらに追求していく必要がある。

2.6 C T A フィルム線量計の較正

C T A フィルムの γ 線に対する線量較正は、2.2 で述べた標準測定点のうちの3点（線源からの距離が 10 cm, 15 cm, 30 cm の各点）で行なった。照射試料は、横幅 7.6 mm, 厚さ 125 μ , 密度 1.32 の C T A フィルムを長さ 4 cm の短冊状に切り、これを6枚づつ並行にして市販の 35 mm 版フィルムホルダーに装填し、両面をアクリルガラス板ではさんだものを用いた (Fig. 6)。アクリルガラス板の厚さは、電子平衡条件の成り立つことと contaminant electrons の影響を除くことを考慮して、0.38 g/cm² とした。

照射は板状線源の中心軸上の各点で照射試料の中心が、照射台上から 15 cm の高さになる空間に照射試料を吊り下げて行なった。各標準測定点での照射線量率は 2.5 で述べたように平行平板電離箱およびフリック線量計を用いて決定されているので、C T A フィルムの吸収線量率 D_c は次式により算出することができる。

$$D_c = \dot{X} \times 0.869 \times {}_{ct}\mu_{en} / {}_a\mu_{en} \times f_a^1 \text{ (rad/h)} \quad (4)$$

ここで \dot{X} は照射線量率 (R/h), ${}_{ct}\mu_{en}$, ${}_a\mu_{en}$ は C T A および空気の質量エネルギー吸収係数, f_a^1 はアクリル板による γ 線の減衰に対する補正係数である。 ${}_{ct}\mu_{en}$ については C T A フィルムの組成を $(C_{12} H_6 O_8)_n$ として、各成分元素の μ_{en}^{10} に関する重量荷重平均から計算された。(附録1参照) その結果、⁶⁰Co - γ 線 (平均エネルギー $E = 1.25$ MeV) に対する ${}_{ct}\mu_{en}$ は 2.81×10^{-2} cm²/g となり、 ${}_a\mu_{en}$ は 2.65×10^{-2} cm²/g であるから、(4)式は次のように書き換えられる。

$$D_c = \dot{X} \times 0.921 \times f_a^1 \text{ (rad/h)} \quad (5)$$

f_a^1 は、線源からの距離が小さくなるにしたがって一次線の斜め入射成分が多くなるために大きくなる。Table 4 に各標準測定点における照射線量率 (平行平板型電離箱で測定した値), f_a^1 の値, および(5)式を用いて計算した C T A フィルムの吸収線量率を示す。

C T A フィルムの照射前後における透過率の測定は、日本分光製 UVIDEC-2 形紫外分光光度計を用いた。測定波長は 280 nm である。照射に用いた試料のうち、60枚の C T A フィルムの照射前の透過率の平均値は 42.10% (空気を 100%) であり、標準偏差 σ は 0.26 でほぼ一定であった。照射後の C T A フィルムの透過率の測定は、照射終了後 20 分以内に行なった。Table 5 はそれぞれ異なる線量率の各標準測定点で照射した C T A フィルムの全吸収線量と吸光度変化 (Optical density ; $\log I_0/I_T$) の平均値を示したものである。吸光度変化のバラツキは ± 0.02 以下であった。較正定数 K は最小自乗法で決定した。吸収線量と吸光度変化の関係を Fig. 7 に示す。Table 5 における K 値から各線量率における吸収線量と吸光度変化との関係は、C T A フィルムの照射前後の透過率を T 、 T とすると次式で表わされる。

$$\log T = \log T_0 - 0.087 D \quad (\text{線量率: } 3.08 \text{ M rad/h})$$

$$\log T = \log T_0 - 0.085 D \quad (\text{線量率: } 2.08 \text{ M rad/h})$$

$$\log T = \log T_0 - 0.089 D \quad (\text{線量率: } 0.83 \text{ M rad/h})$$

ここでDは吸収線量 (M rad) である。K値は各線量率において若干異なっている。測定点の少い2.08 M rad/hrを別にすると線量率の低い方がK値が高い傾向が見られるが、その差は約2%であり、この差から線量率依存性を推定することは困難である。

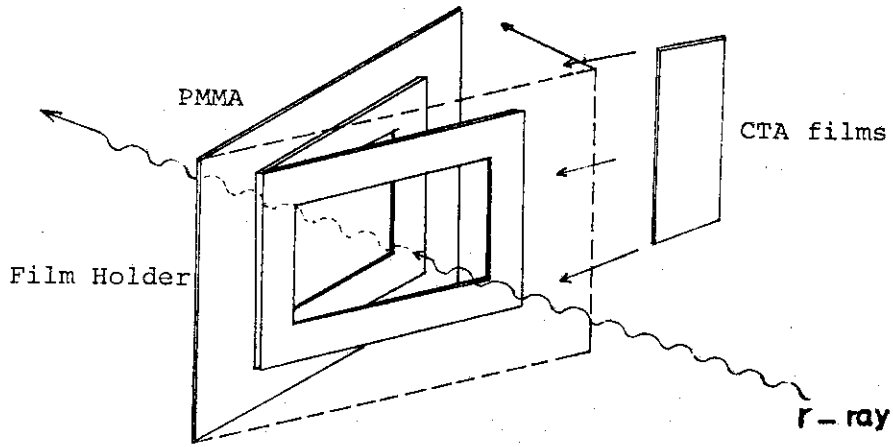


Fig. 6. Irradiation Sample of the CTA Film Dosimeter.

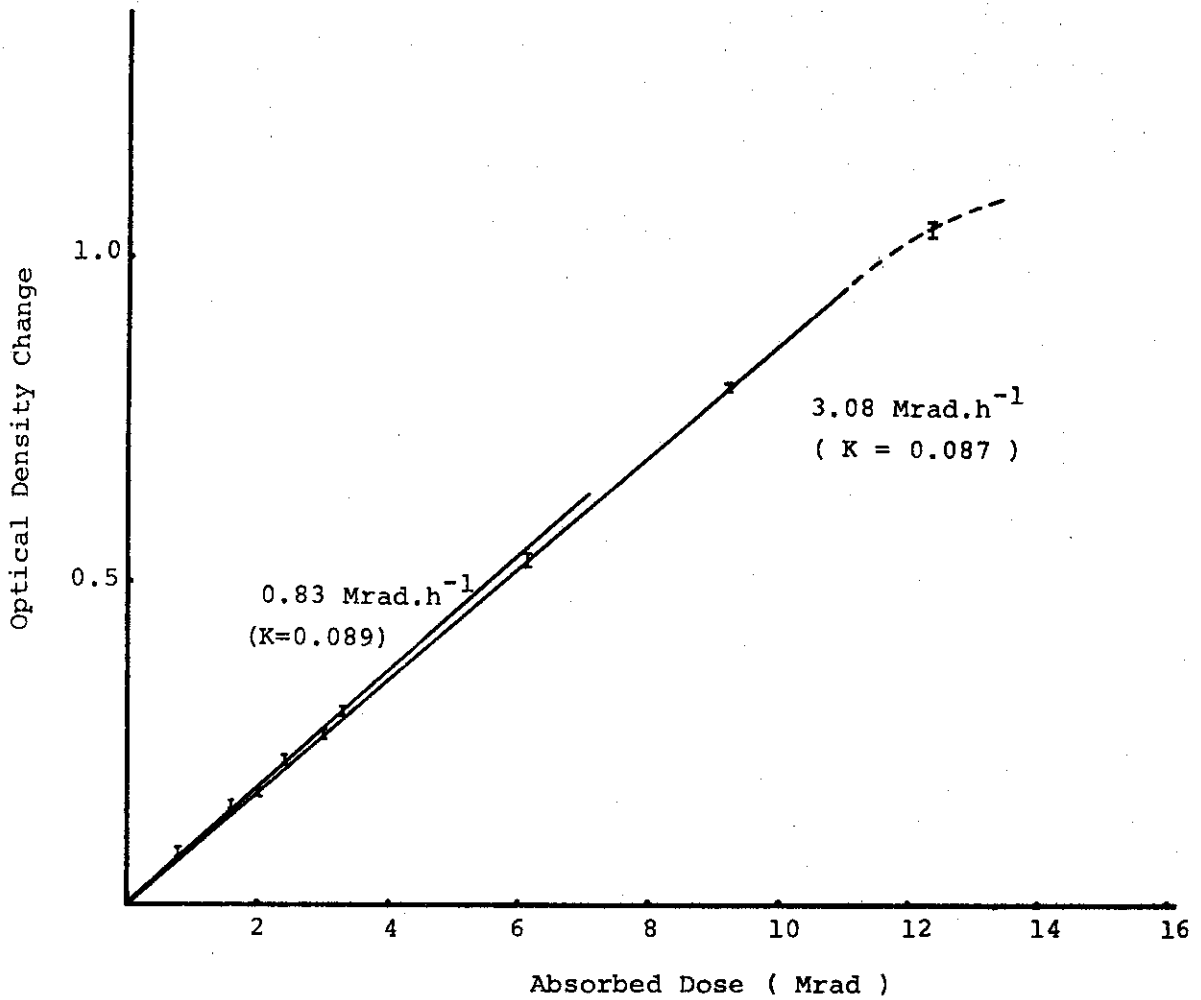


Fig. 7. Relation between the Absorbed Dose and the Optical Density Changes of CTA film for Gamma-ray Irradiation.

Table.4. Evaluated absorbed dose rate in the CTA film at the irradiating position.

DISTANCE FROM SOURCE (cm)	EXPOSURE RATE BY ION. CHAMBER	CORRECTION FACTOR; f_a^1 *	ABSORBED DOSE RATE OF CTA FILM
10	3.46 MR/hr	0.966	3.08 Mrad/hr
15	2.33	0.971	2.08
25	0.927	0.973	0.83

* f_a^1 ; The correction factor for the shielding effect of acrylic-glass plate.

Table.5. Optical density changes of CTA film with irradiation of gamma-rays.

Dose rate	308 Mrad.h ⁻¹	208 Mrad.h ⁻¹	083 Mrad.h ⁻¹
Total dose			
0.83 Mrad			0.0825
1.66			0.1558
2.08		0.1763	
2.49			0.2296
3.08	0.2703		
3.32			0.3027
6.16	0.5300		
9.24	0.7956		
12.32	1.0453		

*K 0.087 0.085 0.089

* $\log T = 200 - KD$ K was obtained by least squares method

3. 電子線に対する較正

1～2 MeVの電子線に対する吸収線量の決定法は、一般論としては ^{60}Co γ 線の場合と本質的に異なっていない。ICRU Report 21¹¹⁾には1～50 MeVの電子線に対する線量決定法が詳しく述べられている。しかしながら、このレポートは主として放射線治療および診断の分野で広く用いられている数MeV以上の医療用加速器を対象としており、さらにここで問題としている大線量照射用加速器で使用している線量率よりもずっと低い領域を扱っている。したがって、この報告に述べられている電離箱やフリック線量測定法は、エネルギーが低いことおよび線量率が高いことの2つの限界によって、照射用加速器に対しては現在のところ信頼に足る線量較正を与えない。電子エネルギーが低いことは被照射体中の飛程が短いこと、多重散乱が大きいこと、深部線量分布が被照射体表面近傍で種々の影響を与えやすいことなどの測定上の困難さを生む。したがって部分吸収型ではなく、全吸収型の強度（エネルギー束密度）測定が線量較正のための前提にならざるを得ない。すなわち線量決定および2次線量計の較正は、2次線量計によって得られた媒体深部方向の相対線量分布の積分値をエネルギー・フルエンス（強度×時間）で規格化することによって可能になる。以下に電子線強度の測定法、測定結果の比較、考察、および較正結果について述べる。

3.1 線源

本実験に使用した電子線加速器は、高崎研究所2号加速器である。本加速器は1966年に設置された、高周波コッククロフト・ワルトン形の電子線加速器であり、Table 6に主な性能を示す。最大出力は15 kW（3.0 MeV, 5 mA）で、電子線エネルギーについては1.0～3.0 MeV、電子線電流は1.0～5.0 mAの範囲で連続可変である。加速管は、長さ約4 mのバイレックス製で、120段の加速電極によって加速された電子は、200 Hzの交流磁場により照射窓面で60 cmの長さで走査された後、厚さ98 μ のチタン箔を通して大気中へ取出される。本加速器による電子線照射は、特殊な場合を除いては照射窓から25 cm下に設置されたコンベアを用いて、電子線走査と直角な方向から試料を移送して行なわれる。

3.2 電子線強度の測定法

電子線強度の測定は次の2つの方法で行なった。

- ① 電子エネルギーおよび入射電子流密度の測定
- ② カロリメトリー

電子エネルギー測定では被照射体表面での入射電子の平均エネルギーを求める必要があるが、照射窓を通して空気中へ出された電子エネルギーの推定は難しいので、加速管内でのエネルギーを測定し、照射窓と空気層での平均エネルギー損失分を差し引いて入射電子の平均エネルギーを求めた。入射電子流密度の測定は、照射窓と空気層による平均2乗散乱角が20°付近の多重散乱領域にあるので、簡便な空気中におけるビーム電流測定法を用いた。カロリメトリー

では最も簡単な空気中におけるグラフィットターゲットの温度上昇速度を測定した。

強度は照射窓中心直下30 cmの固定点での測定と、コンベアを用いた移動測定（電子流密度分布のみ）の2つの方法で行なった。前者はメーター指示電圧1.5 MeV、後者は2.0 MeVで行なった。加速管内での電子線電流はいずれも1 mAとした。固定位置での測定においてビームを受けるターゲットの大きさは電子流密度測定、カロリメトリートともに30 mm ϕ の面積のものを用いた。高速で作動するビームシャッターで照射時間を決定した。

CTAフィルム線量計の較正值は、フィルムを電子の飛程以上に積み重ねて照射し、それから得られた相対的深部線量分布の全積分値を既知のエネルギー・フルエンスで規格化し、その規格化定数として与えられた。固定点での測定に対しては、CTAサンプルはターゲット位置の中心にセットしたが、30 mm ϕ のエリア内での電子線走査と直角方向の電子流密度のわずかな不均一性も較正に対しては考慮した。移動照射では照射条件設定値再現に関わる誤差を無視できるように、CTAサンプルと電子ビームコレクター（後述）を並べてビーム窓下を通過させ、電子流の全積分値からエネルギー・フルエンスを求めた。

3.2.1 電子エネルギーの較正

本実験に用いた加速器の電子エネルギーについての電圧計の較正はアクリル板中の飛程によって較正されているが、飛程からのエネルギー推定にはかなりの誤差がともないやすい。一方、これとは別に7年前には、 NaI(Tl) 単結晶および 90° コンプトン散乱を用いた2結晶法による30 channel波高分析装置によってAuターゲットからの制動X線の最大エネルギーを測定し、これから管内電子のエネルギーを決定した。¹³⁾今回は最も信頼性が高い方法として、制動放射線を利用した ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$ 反応（エネルギーのしきい値 1.666 ± 0.002 MeV）を用いて較正を行なった。ベリリウムターゲットの照射条件をFig. 8に示す。中性子はNakaiら¹⁴⁾の方法に従ってポリエチレンブロックで減速した後、銀箔に吸収させて生じた ${}^{109}\text{Ag}$ からの β 線（半減期2.3分）をGM管で計数し、中性子線束の間接的な相対測定を行なった。ベリリウムターゲットは入射電流50 μA で1分間照射され、その後2分の間隔をおいて5分間銀箔からの β 線を計数した。Fig. 9は電圧計の読みに対して計数率をプロットしたものである。このグラフからは計数率が0になるエネルギーのしきい値が読みにくいので、1.59 MeV（メーター指示値）を零点としたメーターの読みを横軸とする両対数プロットをFig. 10に示す。各プロットを結ぶ直線が1 cpmを切る横軸の値から、1.61 MeVの電圧計の読みが、しきい値に対応することがわかった。各プロットは完全な一直線上に並んではないが、これは電圧計のメーターの目盛が粗いこと、および電圧計が十分安定でなかったためと思われる。電圧計の読みと管内電子エネルギーの比例関係をFig. 11に示す。この方法で得られたエネルギー較正の結果は、制動放射X線の最大エネルギーの測定から求めた結果とよく一致している。

3.2.2 電子流密度の測定方法

照射野における電子流密度の測定には空気中でのビーム電流測定法を用いた。測定に用いた電子ビームコレクターの断面図をFig. 12に示す。ターゲットには30 mm ϕ のアルミニウムを

Type : Gas filled high frequency vertical cascade
 Beam Energy : Controllable 1.0 to 3.0 Mev (stability ; $\pm 2\%$)
 Beam Current: Controllable 1.0 to 5.0 mA
 Maximum Out-put: 15 Kw at 3.0 Mev
 Beam Scanning : 60 cm at the beam window by 200 Hz of electro
 magnetic field.
 Beam Window : 98 μ thickness of Titanium

Table. 6. The characteristics of the 2nd. Accelerator of
 JAERI, TAKASAKI Estab.

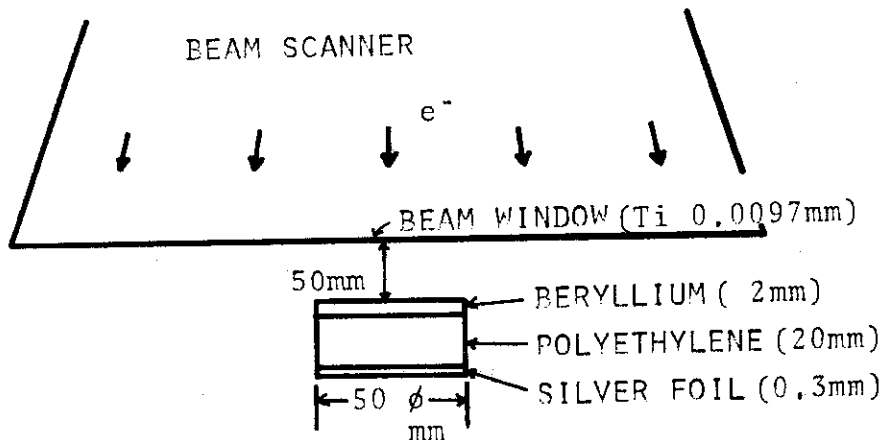


Fig. 8. Irradiation Arrangement of Beryllium Target.

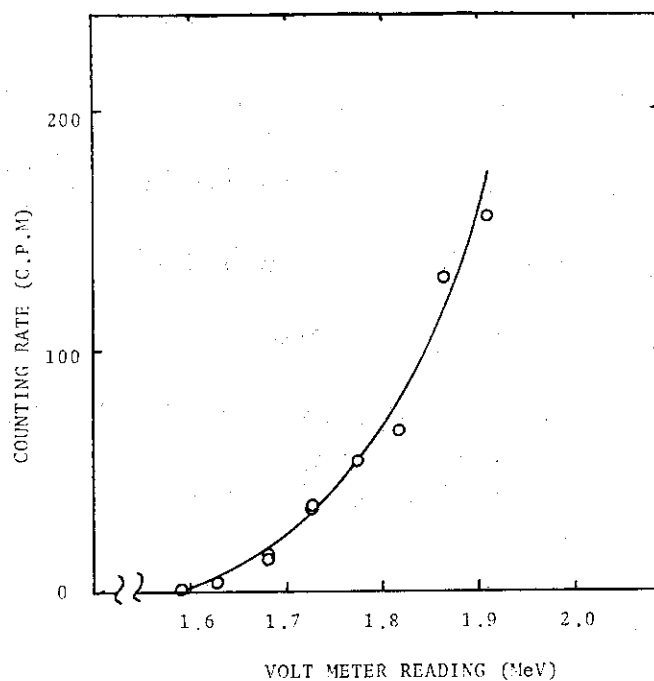


Fig. 9. A plot of counting rates of ^{109}Ag versus Voltmeter Readings.

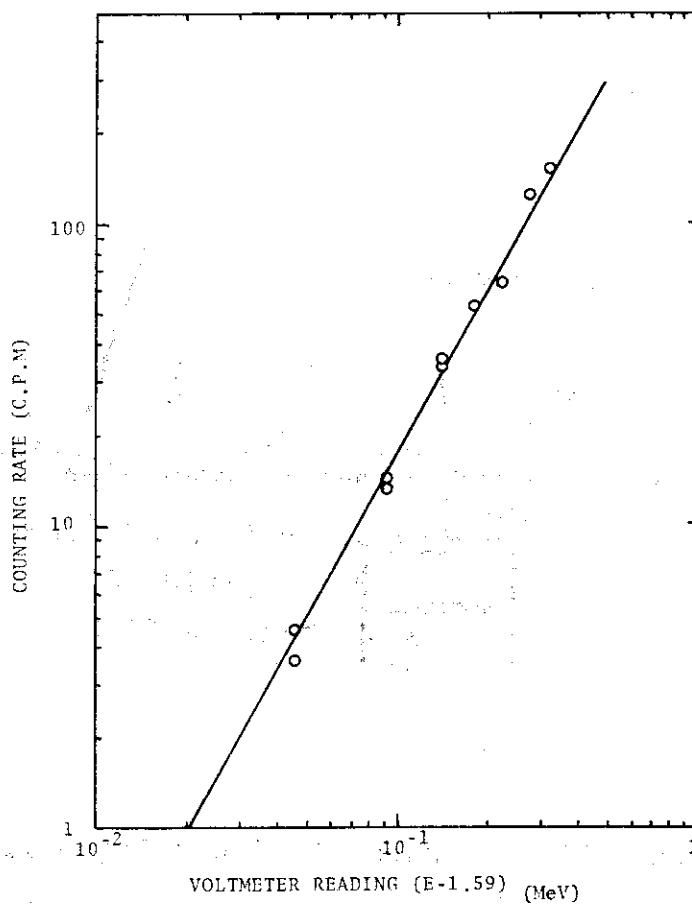


Fig. 10. A Logarithmic plot of Counting rates of ^{109}Ag versus Voltmeter Readings.

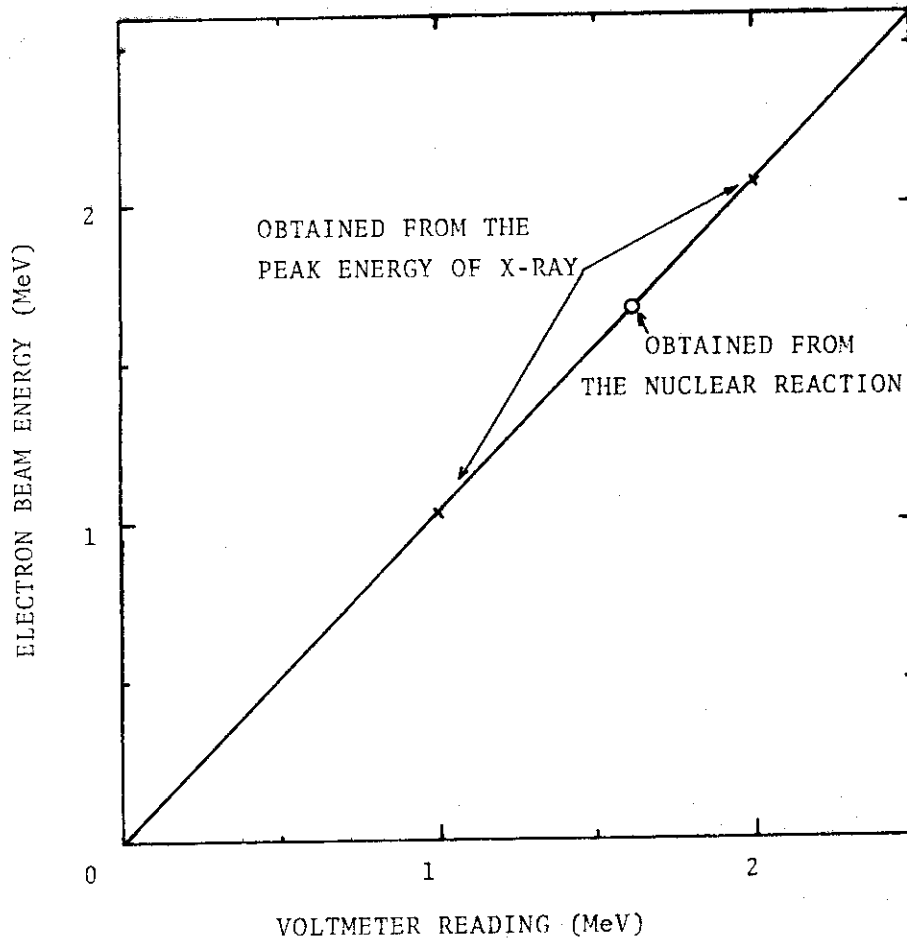


Fig. 11. Relation between the Electron Beam Energy and the Voltmeter Readings.

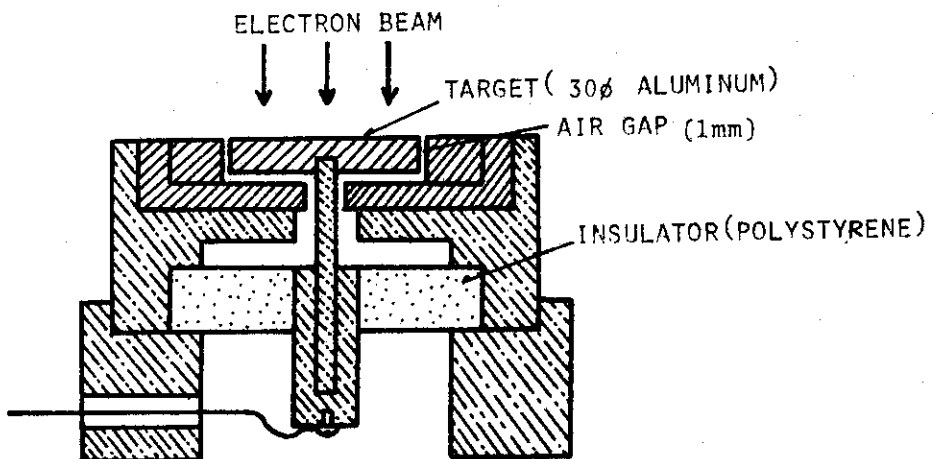


Fig. 12. Sectional View of the Electron Beam Collector.

用いた。ターゲット側壁と接地側の壁とのギャップは1 mmである。ターゲットに投入された電子流は電流積分器 (EROOR A310C) で測定された。ターゲット・アース間の抵抗は10 Ω であった。移動照射の場合はコンベア上に載せた電子ビームコレクターで積分された電子流密度を測定した。ターゲットの収集電荷に対しては次の2つの問題点を考慮した。

- ① 空気中での導体ターゲットによる電子ビームの測定では、ターゲット周囲に形成されるイオンの影響が問題とされるため、真空箱を利用したファラデー・カップが推奨されてきた。しかし十分小さな負荷抵抗を用いればイオンの影響は無視できることが、1~2.5 MeVの電子線に対して確められている¹⁵⁾。
- ② ターゲットに垂直に入射する電子線束に対する後方散乱係数は、電子のエネルギーターゲット原子番号に対して十分信頼できる経験式¹⁶⁾が与えられているので、これを用いて補正を行った。1.5 MeVの電子に対する散乱係数は約6%である。ビーム窓によって散乱された電子による斜め方向からの入射成分は後方散乱を多少増加させる方向に作用するが、今回の測定ではこの効果は無視した。またビームや空気中において生成する Δ 線の効果もわずかながら存在すると考えられるが、空気中の測定では十分に無視できると考えられる。

3.2.3 カロリメトリの方法

空気中の照射野におかれたグラファイトターゲットの照射による温度上昇速度から強度を求めた。被照射体としてはCAPRI から送られてきたグラファイト (密度: 1.788 g/cm³, 比熱 0.18 cal/g \cdot °C) を用いた。測定法の簡略図を Fig. 13 に示す。ターゲットの大きさは3.01 ϕ \times 5.15 mmのディスクを用いた。温度検出には0.1 m ϕ の銅-コンスタンタン熱電対を用いた。検出端はターゲット側壁に掘られた深さ1.5 cmの細孔にグラファイトの粉末とともに埋められた。電子線の強度は照射開始後の温度上昇の勾配から与えられた。照射中の放熱の影響のために温度の立上りは完全な直線にはならず、温度の上昇にしたがって放熱の影響が現われる。この方法では放熱量の補正が困難であるため、発泡プラスチックでターゲットを囲み、放熱量を最小にすることによって放熱の補正は無視した。Fig. 14 に実験結果の代表例を示す。

3.3 電子線強度の評価

照射面での電子線の平均エネルギーは次式から得られる。

$$\bar{E} = E_0 - (\rho_w \cdot X_w \cdot wS_m + \rho_a \cdot X_a \cdot aS_m) \cdot f_p \quad (6)$$

ここで、 E_0 は管内電子エネルギーであり、Fig. 11から決定された。 ρ_w, ρ_a はそれぞれ照射窓 (チタン)、空気 (1気圧) の密度、 X_w, X_a はそれぞれ照射窓と空気層の厚さ ($X_w = 0.098$ cm), wS_m, aS_m はそれぞれ照射窓と空気的全質量阻止能 (1.5 MeVの電子に対して $wS_m = 1.40$ MeV \cdot cm² g⁻¹, $aS_m = 1.68$ MeV \cdot cm² g⁻¹), f_p は電子の path, length に対する補正であり、Yangの方法¹⁷⁾で計算すると約1.05となる。

この計算から1.5 MeV (メーターの読み)で行なった固定照射では \bar{E} は1.43 MeVとなり、2.0 MeVで行なった移動照射では1.96 MeVとなった。

電流密度は固定照射に対して次式で与えられる。

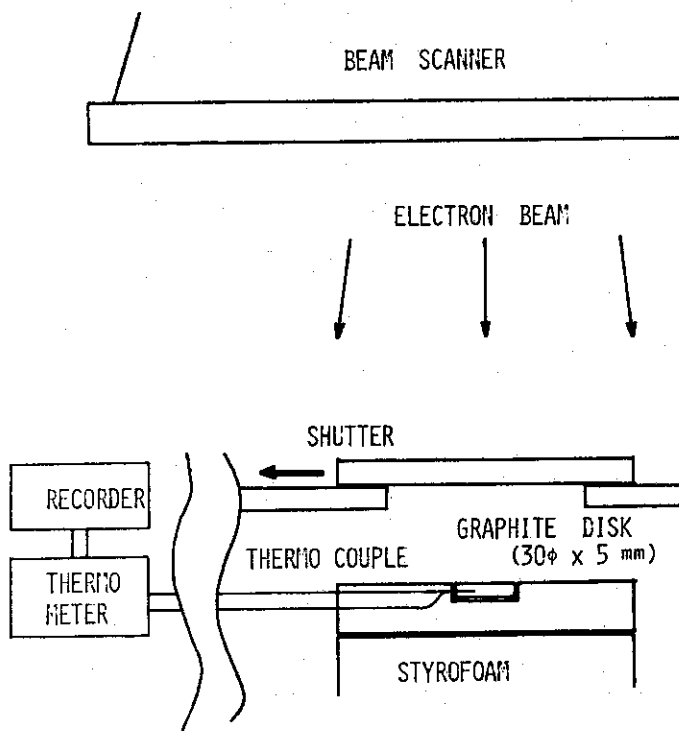


Fig. 13. Schematic Diagram of the Electron Beam Calorimetry.

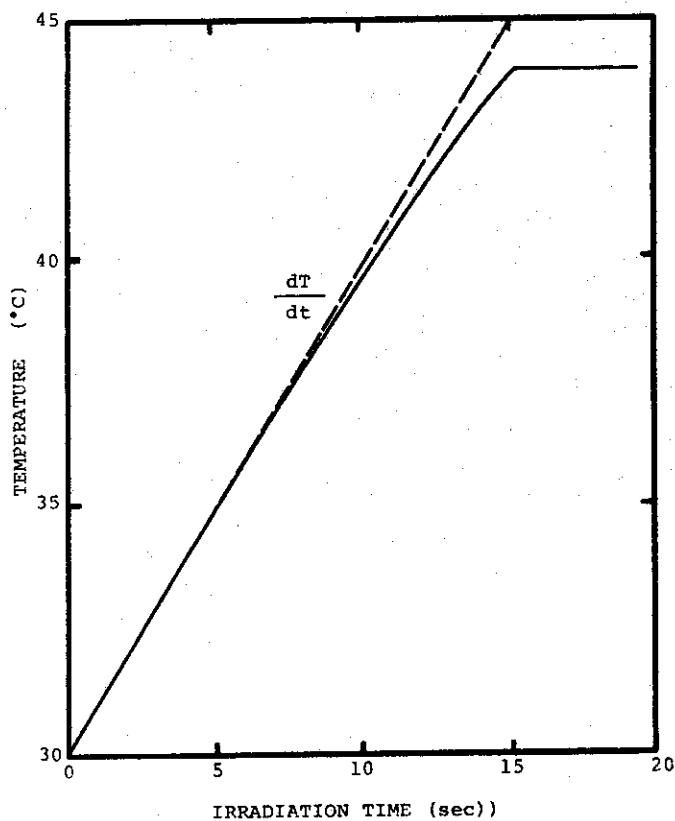


Fig. 14. Experimental result of the calorimetry for 1.5 Mev electron Beam .

$$J = \frac{Q}{(1-\eta) \cdot t \cdot A} \quad (\text{クローン/cm}^2 \cdot \text{sec}) \quad (7)$$

ここで、 Q は実測された電流積分値、 η は後方散乱係数（1.43 MeVに対して0.065）、 t は照射時間（30 sec）、 A はターゲット面積（7.07 cm^2 ）である。

計算の結果 J の平均値は 5.09×10^{-7} クローン/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ となった。したがってターゲット面積内で平均された電子線強度は

$$I = \bar{J} \cdot J = 7.3 \times 10^7 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec}$$

となった。

カロリメトリーから得られる平均電子線強度は次式で与えられる。

$$I = 4.19 \cdot \frac{Cm}{A} \cdot \frac{dT}{dt} \quad \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}} \quad (8)$$

ここで dT/dt は温度上昇速度の実測値（ 1.06 ± 0.03 $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ）、 C はグラファイトの比熱（0.18 cal/deg \cdot g）、 m はターゲットの重さ（6.55 g）、 A はその照射面積（7.11 cm^2 ）である。

計算の結果 I の平均値は 0.74×10^8 erg/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ となった。この値は電荷投入から得られた 0.73×10^8 erg/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ とよく一致している。

電子線強度の評価に対する精度や確度に関する問題点を以下に列記する。

- (1.) 実測値の再現性は電子流密度に対しても、カロリメトリーにおける温度上昇速度に対してもだいたい $\pm 3\%$ 以内であった。固定照射では5回の繰返し実験の平均値を採用することでこれによる誤差をなるべく少くした。移動照射の場合は、CTAフィルムと同時に照射されるのでこれによる誤差はほとんど無視できる。
- (2.) カロリメトリーでは温度上昇速度の勾配を表わす直線の引き方に多少に任意性がある。これによる不確定さはだいたい $\pm 2\%$ 以下である。これは温度上昇に伴う放熱の増大によって温度の直線的上昇部分が長時間続かないために生じる。これは十分電子流密度を小さくし、放熱量を小さく保つことによってある程度避けることが可能である。しかし本加速器では、出力電流の減少に伴って安定性が悪くなるので、電流は小さくできなかった。
- (3.) 電子流密度測定用のターゲット側壁と接地側の壁との1mmの間隙に入射する電子流成分の挙動が明らかにされていない。側壁における電子授受による誤差を少なくするためには、ターゲット面積を大きくすることと、側壁の間隙を狭くすることが必要だが、これらには限度がある。この問題はカロリメトリーにおけるターゲット側壁とポリスチロールとの間の電子平衡条件についても同様の議論が成立つ。しかしこれによる測定誤差は電子流密度測定の時より小さいと考えられる。これらの問題は今後さらに追求していく必要がある。
- (4.) 強度の計算に用いている種々の定数の不確定さについては、グラファイトの比熱、後方散乱係数、阻止能などが問題になる。グラファイトの比熱はCAFRIでの測定結果をそのまま使用しており、精度については不明である。後方散乱係数に対しては3.2.2で述べた通り、斜

め入射によるずれを考慮していない。斜め入射に対する後方散乱の測定データはほとんどないので誤差の評価は難しい。後方散乱係数の非常に小さいグラフィイト (0.014) を用いた測定結果との比較からは無視してもさしつかえないと判断できる。しかし実験的な確認はまだ十分でない。阻止能の計算¹⁸⁾における不確かさはチタン箔の場合2~3%くらい考えられるが、 η の値にはほとんど影響しない。

5. $\text{Be}^0 (\gamma \cdot n)$ 反応による管内電子エネルギーの較正に関わる誤差は、3.2.1に述べた誤差要因があるとはいえず、 $\pm 1\%$ 以下と考えられる。

以上種々の不確かさを生む要因について正確な評価はできないが、電荷投入法とカロリメトリで測定された強度の値は、許容された不確かさの範囲内で十分一致していることがわかる。このことはまだ結論づけるのは早いとしても、従来述べられてきた面倒な方法によらなくとも上に述べた簡単な方法によってかなり正しい線量評価が可能であることを示唆している。今後は残された不明確な誤差要因を定量的に明確なものにしていく必要があるだろう。

3.4 CTAフィルム線量計の較正

CTAフィルム線量計の電子線に対する線量較正は、CTAフィルムの吸光度変化を、熱量計およびビーム電流測定法から得られたエネルギーフルエンスで規格化することにより行なった。較正に使用したCTAフィルムは、 γ 線照射の場合と同一のフィルム (横幅7.6 mm, 厚さ125 μ) を用いた。照射試料は、CTAフィルムを長さ4 cmの短冊状に切り、これを積み重ねてブロック状にしたものをアクリルガラスの容器に入れて使用した (Fig. 15)。アクリルガラスの容器はCTAブロック側面での電子の平衡条件を成り立たせるためのものである。

照射は、加速器照射窓から一定の距離の照射平面内のビーム中心軸上に照射試料を固定した場合 (固定照射)、および照射試料を電子線走査方向と直角な方向にそって移動する場合 (移動照射) について行ない、各々の場合について線量較正を行なった。

3.4.1 固定照射の場合

CTAフィルムの積層ブロック試料を、加速器照射窓から30 cmの照射平面内に固定した状態で照射を行なった。Fig. 16に照射の幾何学的配置を示す。照射時間の制御は試料上部に設置したビーム・シャッターを用いた。照射時における加速器の出力条件は、1.5 MeV, 1.0 mA (各れも加速器制御盤メーター指示値) で、CTAブロックの照射時間は40秒であった。CTAブロックに入射する電子線のエネルギー・フルエンス (強度 \times 時間) の測定は、Fig. 16に示したCTAブロックの照射位置と同位置にグラフィイト熱量計および電子ビームコレクターを置いて行なった。

照射したCTAブロックは、照射後30分以内にブロックの各1枚毎のフィルムについての吸光度変化を分光光度計で測定した。測定波長は280 nmである。この結果得られた各フィルムの吸光度変化を、横軸をCTAブロックの表面からの"深さ" (g/cm^2) として対応させると、Fig. 17に示すCTAブロックの深さ方向について吸光度変化で表わした相対的深部線量分布が求まる。CTAフィルムの吸光度変化に対する線量較正は、Fig. 17の深部線量分布曲

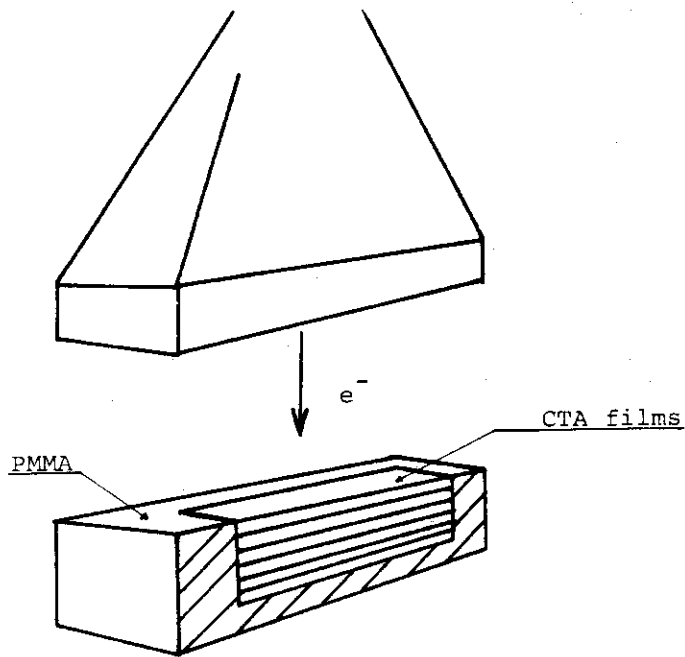


Fig. 15. CTA Sample for the Electron Beam Irradiation.

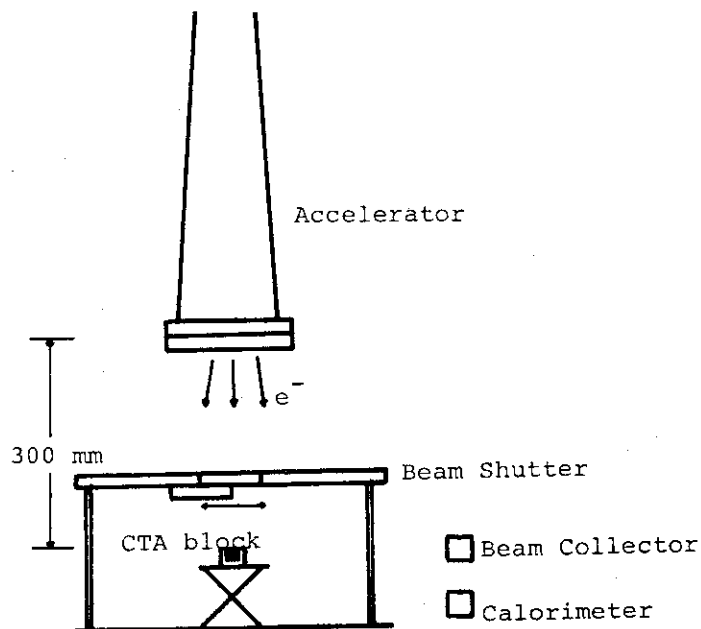


Fig. 16 Geometrical Arrangement of the Fixed Electron Beam Irradiation.

線の下に含まれる面積をCTAブロックに入射するエネルギー・フルエンスで割ることによって得られる。今、単位吸収線量当りのCTAフィルムの吸光度変化を K ($\Delta OD/\text{Mrad}$)とすると、 K の値は次式によって求まる。

$$K = \frac{\rho \cdot X \cdot \sum_i J_i}{F} \times 10^{-8} \quad (\Delta \cdot OD/\text{Mrad}) \quad (9)$$

ここで、 ρ はCTAフィルムの密度 (1.32 g/cm^3)、 X はフィルム1枚の厚さ (0.0125 cm)、 J_i は i 番目のフィルムの吸光度変化 (ΔOD)、 F はCTAブロックに入射するエネルギー・フルエンス (強度 $I \text{ erg/cm}^2 \times$ 時間 $t \text{ sec}$) である。 $\rho \cdot X \cdot \sum_i J_i$ はFig. 17の深部線量分布曲線を数値積分した結果0.1823であった。上式の F に3.3項で述べた値を代入すると、 K の値は電子ビームコレクターによる強度測定の結果を用いた場合 $K = 0.062$ 、熱量計の測定結果を用いた場合 $K = 0.062$ であった。したがって、この K の値から、CTAフィルムの照射前後の透過率 T_0 、 T と吸収線量 D (Mrad)との関係は次式により表わされる。

$$\log T = \log T_0 - 0.062 D$$

3.4.2 移動照射の場合

移動照射の場合は、加速器照射窓から 2.1 cm の照射平面内で電子線走査方向と直角な方向からコンベアで試料を移送しながら照射を行ない、同時に電子ビームコレクターで全入射電荷量の測定を行なった。この時の加速器の出力条件は、 2.0 MeV 、 1.0 mA で、コンベア速度は 90 cm/min であった。(Fig. 18)

移動照射の場合も固定照射の場合と同様にして K 値を決定した。Fig. 17に測定の結果得られた深部線量分布曲線を示す。これから数値積分して求めた $\rho \cdot X \cdot \sum J_i$ は 0.2312 、投入電荷法による全入射電荷量は 1.788×10^{-5} クローン/ cm^2 、入射する電子の平均エネルギーは 1.96 MeV であった。これらの数値を(9)式に代入すると K は 0.066 ($\Delta OD/\text{Mrad}$)となり、したがってこの場合のCTAフィルムの照射前後の透過率 T_0 、 T と吸収線量 D (Mrad)との関係は次式で示される。

$$\log T = \log T_0 - 0.066 D$$

K 値は固定照射の場合より少し高い。この原因としては移動式の入射電荷測定法、線量計自身の再現性などが考えられるが、実験的に確認されていない。

以上の結果から電子線に対するCTAフィルム線量計の K 値は、固定照射の場合 0.062 でビーム電流測定法および熱量計による校正法共によく一致する結果が得られた。Table 7に本実験の結果得られたCTAフィルム線量計の K 値と吸収線量率の関係を示す。電子線照射については、交流電磁場による電子線の走査や照射窓および空気層での散乱によって、照射野での線量率は各点において複雑な時間的分布を示し、一概に定めることは困難であるが、一応の目安として平均吸収線量率を示した。Table 7によって明らかをように K 値は γ 線照射の場合と電子線照射の場合で異なり、線量率依存性があることが確かめられた。また電子線の場合、深部線量分布曲線のtail部分において、入射電子のエネルギーが減少することによるCTA

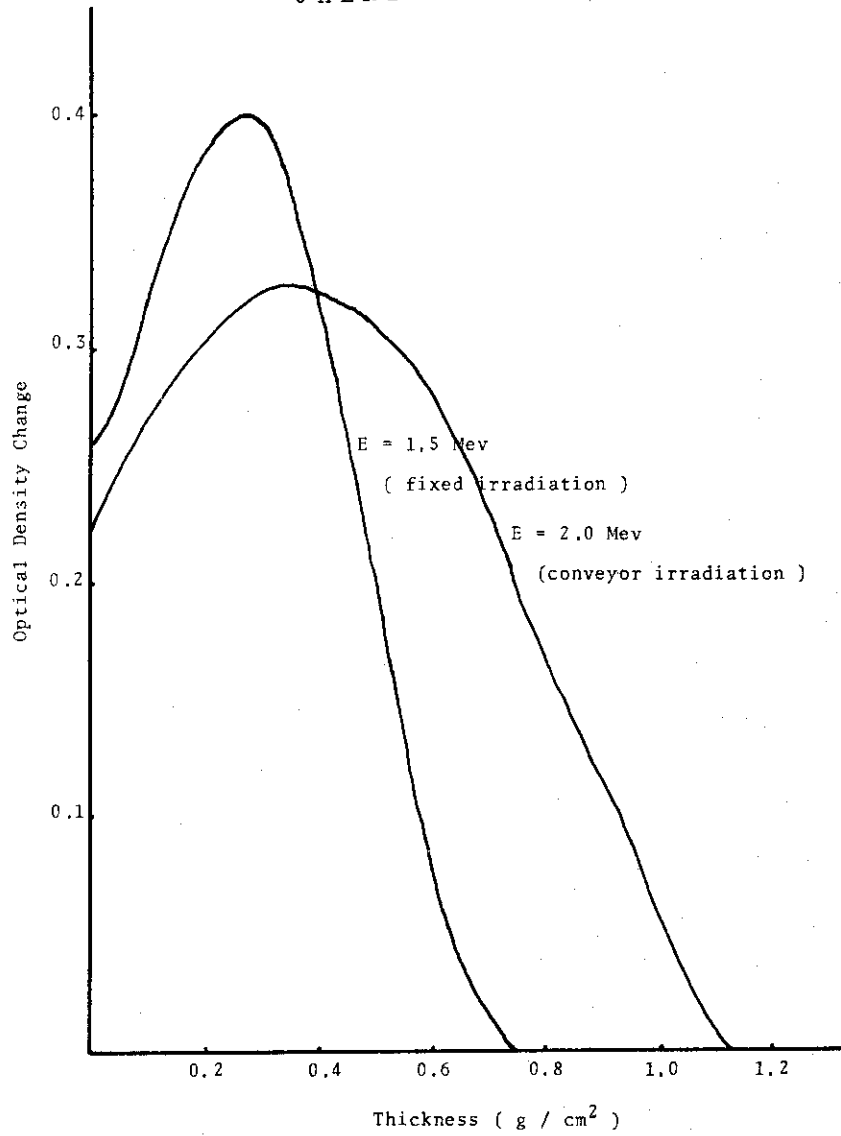


Fig. 17. Depth Dose Distribution in the CTA block.

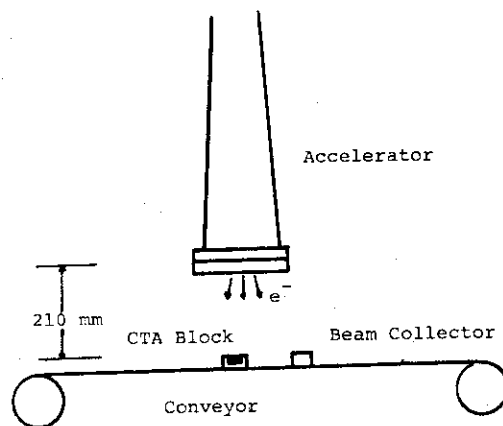


Fig. 18. Geometrical Arrangement of Conveyor Irradiation.

DOSE RATE	K VALUE	CALIBRATION METHOD	IRRADIATION METHOD
0.831 Mrad/hr	0.089	Ionization Chamber	⁶⁰ Co- γ ray Fixed irradiation
2.08	0.085	Ionization Chamber	⁶⁰ Co- γ ray Fixed irradiation
3.08	0.087	Ionization Chamber	⁶⁰ Co- γ ray Fixed irradiation
240	0.062	Calorimetry	1.5 Mev Electron beam Fixed irradiation
240	0.062	Beam Current Measurement	1.5 Mev Electron beam Fixed irradiation
—	0.066	Beam Current Measurement	2.0 Mev Electron beam Conveyor irradiation

Table. 7. K value of CTA Film Dosimeter for various calibrations.

フィルムの着色のG値に対する影響が若干問題となるかもしれないが、一般的にG値のエネルギー依存性は約100 KeV以下のエネルギー範囲で考慮すればよいと思われるので、この場合は無視した。

4. あとがき

γ 線、電子線の大線量照射に対しては、線量基準が各照射施設の間で一致していないことが最近問題になっている。¹⁹⁾これに対しては基準となる個々の測定法自体の問題もさることながら、線源自身の特殊な性格やそれにとりまわり補正の重要性などが指摘されてきた。今回はこれらの疑問点を明らかにしていく目的で ^{60}Co γ 線、1.5~2 MeV電子線の両方に対して、それぞれ異なる方法による線量評価を試みた。その結果線量決定に関わる種々の定数の不確定さと実験誤差の範囲内では全体として一応良い一致が得られた。しかしこの一連の比較実験ははじめての試みであったので補正条件や実験精度の検討が十分でなかったこと、および時間的余裕がなかったために線量評価の再現性を十分に確認できなかったことを考えると、疑問点のうち多くのものは未解決のまま残っている。

測定法に関しては、従来フリック線量計による線量較正が γ 線に対してよく用いられてきたが、本実験の結果から電離箱の信頼性が十分高いことが明らかになったと言えよう。電離箱測定法の簡便さを生かして、今後は現在の reference dosimeter の段階から副標準的な線量計へ改良していく必要があるだろう。電子線に対する2つの方法は、原理的容易さにもかかわらず十分経験を積んだ方法でなく、極く試験的段階にあるので、信頼性を高めていくのは今後の課題である。

今回の線量較正によってCTA線量計は線量率依存性があることが判明した。この線量計は目下開発途上の段階にあるので、線量率依存性の原因、およびそれから派生する実用上の問題は、線量計自身の課題として今後追求していく必要がある。

謝 辞

本実験の中の電離箱による測定に対して電子技術総合研究所主任研究官、加藤朗氏から御援助、ならびに有益な御助言をいただいたことを感謝致します。また、電子線エネルギーの較正実験に関して御指導をいただいた大阪研究所副主任研究員中井洋太氏、鉄線量計による測定に関して御協力いただいた研究部鈴木伸武氏、山本忠利氏、照射施設課菊地孝行氏、電子線照射について御協力いただいた照射施設課須永博美氏に感謝致します。また、本報告をまとめる際に御指導いただいた照射施設課長田村直幸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) ICRU Report 10b "Physical Aspects of Irradiation" (1963)
- 2) Study of Improvement of Cellulose Triacetate Dosimeter J. Laizier, S. Hashimoto; K. Yotumoto, R. Tanaka, E. Kageyama, K. Matuzaki, and A. Danno. JAERI-memo 5136. (1973)
- 3) ICRU Report 14 "Radiation Dosimetry : X Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies Between 0.6 and 50 MeV (1969)
- 4) 森内和之 : 応用物理, 35, 84 (1966)
- 5) 田中, 田島, 河合 : 第34回応物学会予稿集 304 (1973)
- 6) Ritz, V. H., and Attix, F. H. : Rad. Res. 16, 401 (1962)
- 7) Allen, A. O., and Rothschild, W. G. : Rad. Res. 7, 591 (1957)
- 8) Barr, N. F., and King, C. G. ; J. Am. Chem. Soc. 78, 303 (1956) ; 76, 5565 (1954).
- 9) Tanaka, R., Tajima, S. and Usami, A. : Int. J. Appl. Radiat. Isotopes 24, 627 (1973)
- 10) Attix, et al. : "Radiation Dosimetry I" 2nd ed. Academic Press (1968)
- 11) ICRU Report 21 "Radiation Dosimetry : Electrons with Initial Energies Between 1 and 50 MeV" (1972)
- 12) 大島, 四本, 田中, 田島, 須永 : JAERI-1190 (1970)
- 13) 田中, 宮永, 大島 : 第14回応物学会予稿集 47 (1967)
- 14) Nakai, Y. and Horikiri, S. : Isotopes and Radiation 2, 233 (1959)
- 15) 田中, 四本, 須永, 水橋 : 第10回理工学における同位元素研究発表会要旨集 44 (1973)
- 16) Tabata, T. Ito, R. and Okabe, S. ; Nuclear Instrum. and Methods 94, 509 (1971)
- 17) Birkhoff, R. D. "Handbuch der Physik, Vol 34, 90 (1958) Springer. Berlin.
- 18) Berger, M. J. and Seltzer, S. M. ; NASA SP-3012 (1964)
- 19) 古田, 他 : 第10回理工学における同位元素研究発表会要旨集 46 (1973)

付 録 (Appendix)

Table.1. Mass Energy Absorption Coefficient (cm^2/g) of the CTA film

Energy	C	O	H	Air	CTA
0.5 MeV	0.0297	0.0297	0.0593	0.0296	0.0314
0.6	0.0295	0.0296	0.0587	0.0295	0.0312
0.8	0.0288	0.0289	0.0574	0.0289	0.0304
1.0	0.0279	0.0278	0.0555	0.0254	0.0294
1.5	0.0255	0.0254	0.0507	0.0254	0.0269
2.0	0.0234	0.0234	0.0465	0.0234	0.0247
3.0	0.0204	0.0206	0.0399	0.0205	0.0216

Composition of the CTA Film : $(\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{O}_8)_n$

$$\mu_{\text{CTA}} = \frac{3\mu_{\text{C}}A_{\text{C}} + 4\mu_{\text{H}}A_{\text{H}} + 2\mu_{\text{O}}A_{\text{O}}}{3A_{\text{C}} + 4A_{\text{H}} + 2A_{\text{O}}}$$

$$A_{\text{C}} = 12.0112$$

$$A_{\text{H}} = 1.00797$$

$$A_{\text{O}} = 15.9994$$

Table. 2. Stopping power of CTA film : $(C_{12}H_{16}O_8)_n$

$$(Z/A) = 0.527, \log I = 4.274, Z = 6.608$$

Energy	Collision	Total
0.1 MeV	4.278 MeV cm^2/g	4.282 MeV cm^2/g
0.2	2.862	2.867
0.3	2.385	2.392
0.5	2.023	2.032
0.7	1.883	1.895
1.0	1.797	1.814
1.2	1.771	1.791
1.5	1.754	1.779
2.0	1.749	1.782
2.5	1.755	1.797
3.0	1.765	1.815
4.0	1.780	1.847
5.0	1.800	1.885

These value were calculated by the next equation¹⁸⁾:

$$1/\rho (dE/dX) = 2\pi N_a r_0^2 mc^2 / \beta^2 \times Z/A \{ \log [T^2 (T+2) / 2 (I/mc^2)^2] + F(T) - \sigma \}$$