

JAERI-M

5775

Febetron 706 のパルス電子線特性

1974年7月

堀田 寛・田中 隆一・須永 博美
鷲野 正光・杉浦 俊男・鈴木 伸武

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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、複製などのお問合せは、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.

Febetron 706 のパルス電子線特性

日本原子力研究所高崎研究所

堀田 寛，田中隆一，須永博美

鷲野正光，杉野俊男，鈴木伸武

(1 9 7 4 年 6 月 2 2 日受理)

Febetron 706 (定格エネルギー - 600 KeV) のパルス電子線特性を測定した結果を本報にまとめた。電子流の形を媒体気体の発光の写真で観測すると、気体圧がある条件のとき電子線が自己集束することがわかった。この現象をさらに電子流の軸上に置かれたアルミニウム中の深部線量分布の測定によって研究した。このために、アルミニウムとブルー・セロファンを多重積層した線量計を用いた。ブルー・セロファン線量計の性質について詳しく検討した。他の線量計も併用した。パルス当たりの全エネルギーはアルミニウム熱量計で測定した。実験室内の制動放射 X 線の空間分布は熱蛍光線量計で測定した。

Characteristics of the Pulsed Electron Beam from Febetron 706

Hiroshi HOTTA, Ryuichi TANAKA, Hiromi SUNAGA

Masamitsu WASHINO, Toshio SUGIURA and Nobutake SUZUKI

Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, JAERI

(Received June 22, 1974)

The pulsed electron beam, generated from a Febetron 706, was examined by several methods. Photographs of the emission of the beam profile indicated that the beam is self-focusing at a certain pressure of the gaseous medium. The phenomenon was further studied by measuring the depth-dose distribution in an aluminum set placed on the beam axis. A stack of aluminum absorbers and blue cellophane sheets was used as the dosimeter. The characteristics of the blue cellophane dosimeter was examined in detail. Other dosimeters were also used supplementally. The total energy per pulse was measured by an aluminum calorimeter. The dose distribution of bremsstrahlung in the laboratory was also measured by a thermoluminescence dosimeter.

目 次

1	まえがき	1
2	Febetron 706 の性能	2
3	パルス電子線の特性	6
3.1	気体中の電子線の拡がりの写真観測	6
3.2	パルス波形の観測	6
3.3	熱量計によるパルス当たりの全エネルギーの測定	9
3.4	2次線量計の条件	9
3.5	ブルー・セロファン線量計	11
3.5.1	ブルー・セロファンの線量較正	11
3.5.2	空気線量分布および電子束分布	15
3.5.3	深部線量分布	17
3.6	その他の2次的測定法	20
3.6.1	熱ルミネッセンス線量計	20
3.6.2	Radiochromic dosimeter	21
3.6.3	P E T P 線量計	21
3.6.4	P M M A 線量計	21
3.6.5	コバルトガラス線量計	23
4	制動放射X線の空間分布	25
5	参考文献	

1 ま え が き

昭和46年5月末、主として気体のパルス放射線化学の研究のために Febetron 706 が高崎研究所研究部に設置された。分光学的方法による反応の研究に先立って行われた、発射されたパルス電子線の特性の物理的測定結果をこゝにまとめた。これらの作業は共同して行われたが、物理的側面は主として田中が、電気回路的側面は主として須永が、本報には記載されていないが光学的側面は主として鶴野が担当した。制動放射X線の空間分布の項はこの装置の安全審査のために杉浦がまとめたものをもとに測定値を加えた。これらの測定から発展した大強度パルス電子線のピンチ効果と媒体気体の性質との関係の組織的研究は別に Radiation Research に投稿した。

2 Fe betron 706 の特性

Fe betron 706 は Field Emission 社 (Oregon, U.S.A.) 製の電子線パルス発生装置で、Field Emission (冷陰極尖端放電) 法によるものである。この装置のプロックダイヤグラムは Fig. 2.1 に示した。本体の Pulser は 直径 50 cm, 長さ約 110 cm の円筒で、Outer Electrode と呼ばれる円錐台形 (直径 13~18 cm, 長さ 40 cm) のものが一端に突出している。この先端からパルス電子線が出る。本体の後方にはトリガー回路とそのシールドケースが取付けられている。本体の内部構造を概念的に示すと Fig. 2.2 のようになる。¹⁾ 内部は圧力と充填物質の異なる 5 つの部分に分れている。600 kV の Marx 型高電圧発生機は鐘形の圧力容器 Module Chamber に入っていて、15 枚の Module を底板の上に積み重ねて横倒しにした型になっている。Module は上端と下端のものは構造が異なり、その間に内部回路が右旋のものと左旋のものが交互に重ねてある。これ等の円板は中央に穴があって 2 対の放電極が出ている。高圧を発生させるには、各 Module 内のコンデンサーを約 30 kV に充電しておき、下端の Module の放電極の一つに 17.5 kV のトリガーパルスをかけて放電させ、30 対の放電極を次々と放電状態にすると、30 箇のコンデンサーが直列に接続した状態となり、上端の Module に高電圧が発生する。トリガーパルスは押ボタン回路などのパルスを Delayed Trigger Amplifier で 2.5 kV に増幅整形してから、パルストランスで昇圧して得ている。

Module Chamber で発生した高電圧は Switch Chamber と Tube Chamber 内にある Short Pulse Adapter で波形を狭く整えられて電子管に伝えられる。電子管中のタンクステンの冷陰極の尖端から電子が飛び出して対陰極 (この場合チタン箔 (厚さ 0.0025 cm) の電子管の電子取出し窓) との間で加速されて、パルス電子線が窓から放出される。Module Chamber と Switch Chamber は放電スイッチを内蔵しているので、よく乾燥した窒素または空気を元填し、放電による生成物がこれらガスの耐電圧性能を劣化させて時々交換する必要がある。ガスの圧力は放電圧によってきまるので、取扱書のグラフから適正な圧を読み取って設定し、常に一定にしておく必要がある。Switch Chamber の圧が下ると電子線の出力が著しく低下し、また Module Chamber の圧が下ると異常放電によって Module を破損するおそれがある。

Tube Chamber 内には単純な形のキャパシターとインダクターがあり、一種の立体回路を形成している。こゝには誘電媒体としてトランス油を入れ、多少の発熱があるのでタンクとポンプで循環する。Tube Chamber の外壁の下側には Voltage Divider の出力端子があり、この出力信号 (数十ボルト) は電子線パルスとのタイミングが安定しているのでシンクロスコープのトリガーなどに使用できる。

電子管はインダクターの中に挿入されている。通常 5515 と 5510 が使用されているが、5516 や 5517 も試作されている。それ等の性能は Table I に示す通りである。直接、電子線を取出す外に厚さ 0.1 mm のタンクステンのターゲットを置いて X 線に変換したり、ZnS (345 nm), ZnSe (487 nm), CdS (530 nm), ZnTe (567 nm), CdSe (735 nm) などの蛍光体をおいて電子線自体よりも短いパルス巾の光を得ることが可能で、これらの目的のための附属品が市販されている。

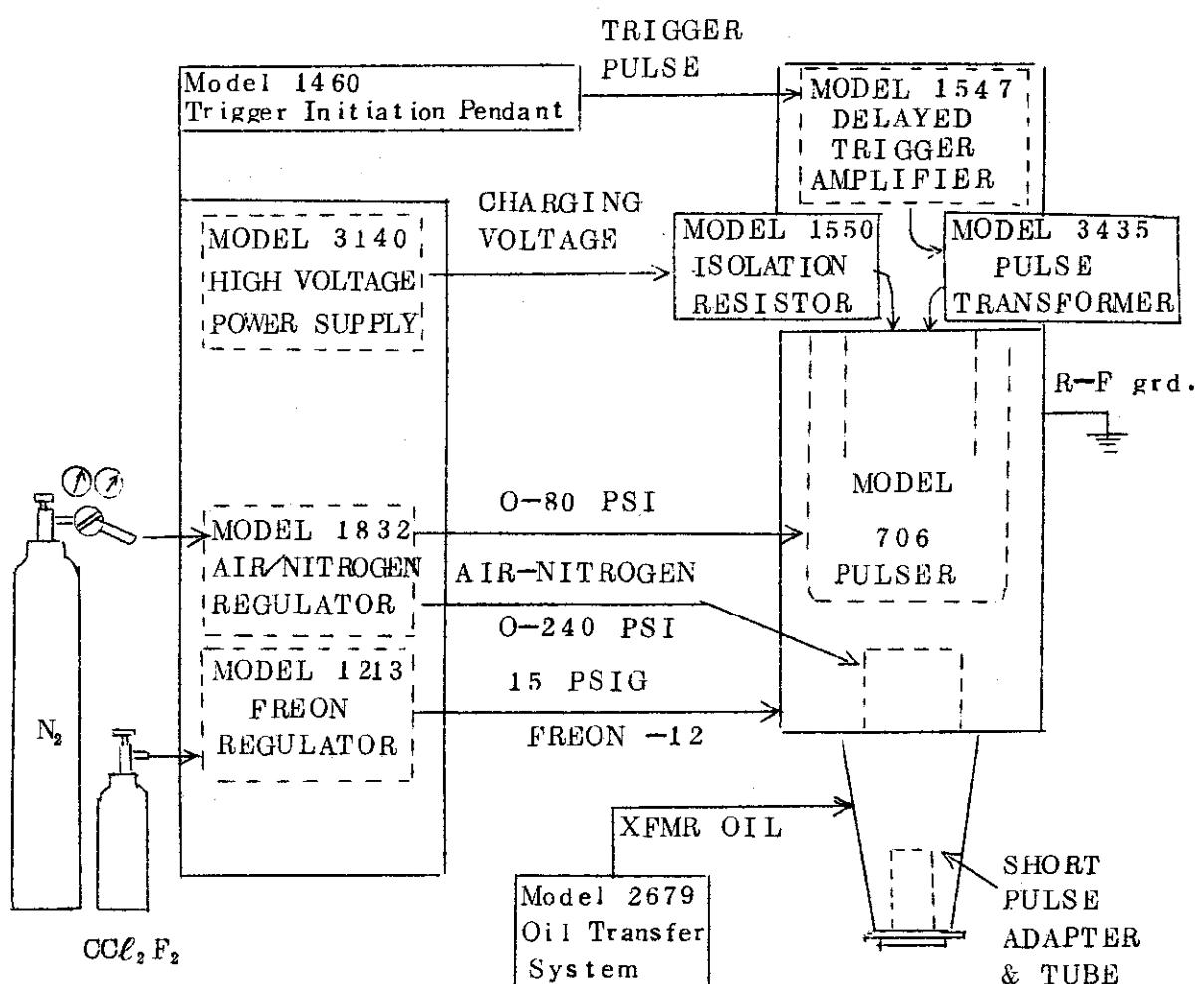


Fig. 21 Block diagram for a standard Model 706 system.

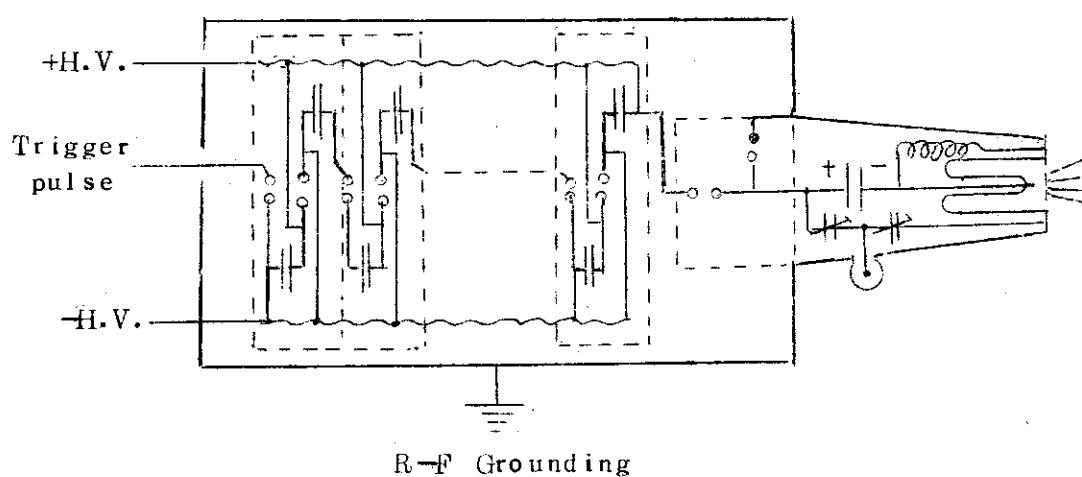
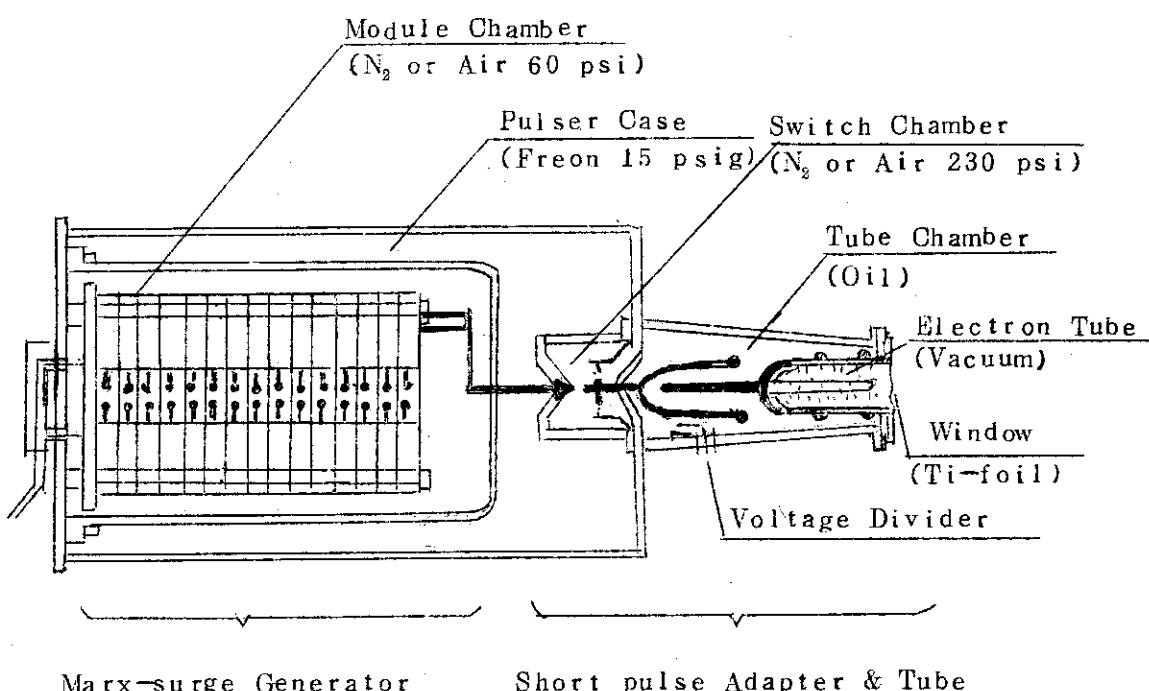


Fig. 2.2 Schematic diagram of pulser.

TABLE I

Febetron 706. Average Measured Beam Characteristics for Various Tubes

Tube Model	Round Beam			Line Beam
	5510	5515	5516	5517
Charging voltage, kV	30	30	30	30
Effective pulse duration, nsec	3	3	3	3
Output energy, J	9.5	11.1	12.1	8.5
Maximum beam fluence, J/cm^2	4.5	10.1	13.4	4.1
Eff. beam area at window, cm^2	2.1	1.1	0.8	2.1
Effective beam width, cm (D)	1.65	1.2	1.0	2.3
Max. peak current density, A/cm^2	4000	9000	12000	3500
Approximate charge density, $\mu C/cm^2$	12	30	40	10
Surface dose in aluminum, Mrad (X_0)	3.3	5.3	7.5	4.2
Linear range in aluminum, mg/cm^2	165	212	130	145
Electron equivalent energy, keV	530	625	440	480
Figure of merit for transverse gas excitation, $X_0 D$, Mrad.cm	5.5	6.4	7.5	9.7

3 パルス電子線の特性

3.1 気体中の電子線の拡がりの写真観測

Febetronからのパルス電子線が気体中を通過するとき生じる励起発光を写真撮影することにより、媒質気体中でその電子線がどのような挙動をするかを観測した。実験は大気中か硬質ガラス製円筒容器（30 cm ϕ ×40 cm）中にヘリウムをつめ、円筒軸方向に電子線を厚さ0.1 mmのステンレスの窓を通して入射させるとして行い、室内を暗くしてポラロイドカメラで撮影した。照射条件は次の通りである。

電子管 5515

Charging voltage 28KV DC

Polaroid Land Camera Model 120

Polaroid Polascope Type 47 Land Roll Film ASA 10000

しほり 各写真に f の値を示してある。

Photo.1はヘリウム中の結果で(a)は10 torr,(b)は60 torr,(c)は500 torrの場合である。これを見ると10 torrと600 torrで電子線はよく集束し所謂ピンチ効果が現われていて、60 torrでは発散していることが芯がないことでわかる。この現象はヘリウム中に多重層線量計を置いて深部線量分布を詳しく測定することによって解明した。一部は3.5.3に述べてあるが詳細は別に Radiation Research に投稿した。圧力が増加すると全体の発光量が増加するので、同じ紋りで撮影すると600 torrの方が10 torrより拡がっているように見える。2 torrでは発光量不足のため撮影できなかった。

Photo.2(a)は大気中で撮影したもので、窓から30 cm以上では発光は観測されなかつた。これは通常の強度の弱い定常的電子線では理解し難い現象であり、大強度パルス電子線特有の現象と思われる。Photo.2(b)はしばしば観測される電子線の先端が折れまがる現象を大気中で撮影したもので、窓から20 cm以上離れたところでよく現われる。おそらくプラズマ現象によく見られる凸形ピンチの不安定性に関係するものだろう。この不安定性は線量測定にとってはやつかいな問題で、窓から離れたところでは再現性を悪くする。この問題からのがれるためにはドリフト場に外部磁場をかける必要があろう。

ヘリウム10 torrのように電子線がよく集束する条件で電子流の軸上に30°程度の角度をもたせたアルミニウム板をおくと、Photo.1(d)のように鏡のよう電子流が曲がることが観測される。これは所謂 image forceによるもので、導体の背後に逆向きの電流が誘起されるために生ずるもので、よく集束しているもの程その力は強い。

3.2 パルス波形の観測

Fig.3.1はパルス波形を測定するための装置の配置を模式的に示したものである。(b)に電子管の窓面に取付けたファラデーカップ（Model 1653）を示したが、このカップの中心にある直径0.020インチの穴を通して集められた電子線をオッショロスコープ（Hewlett-Packard 183A, 500MHz）で観測した。カップとオッショロスコープの間には減衰器（Hewlett

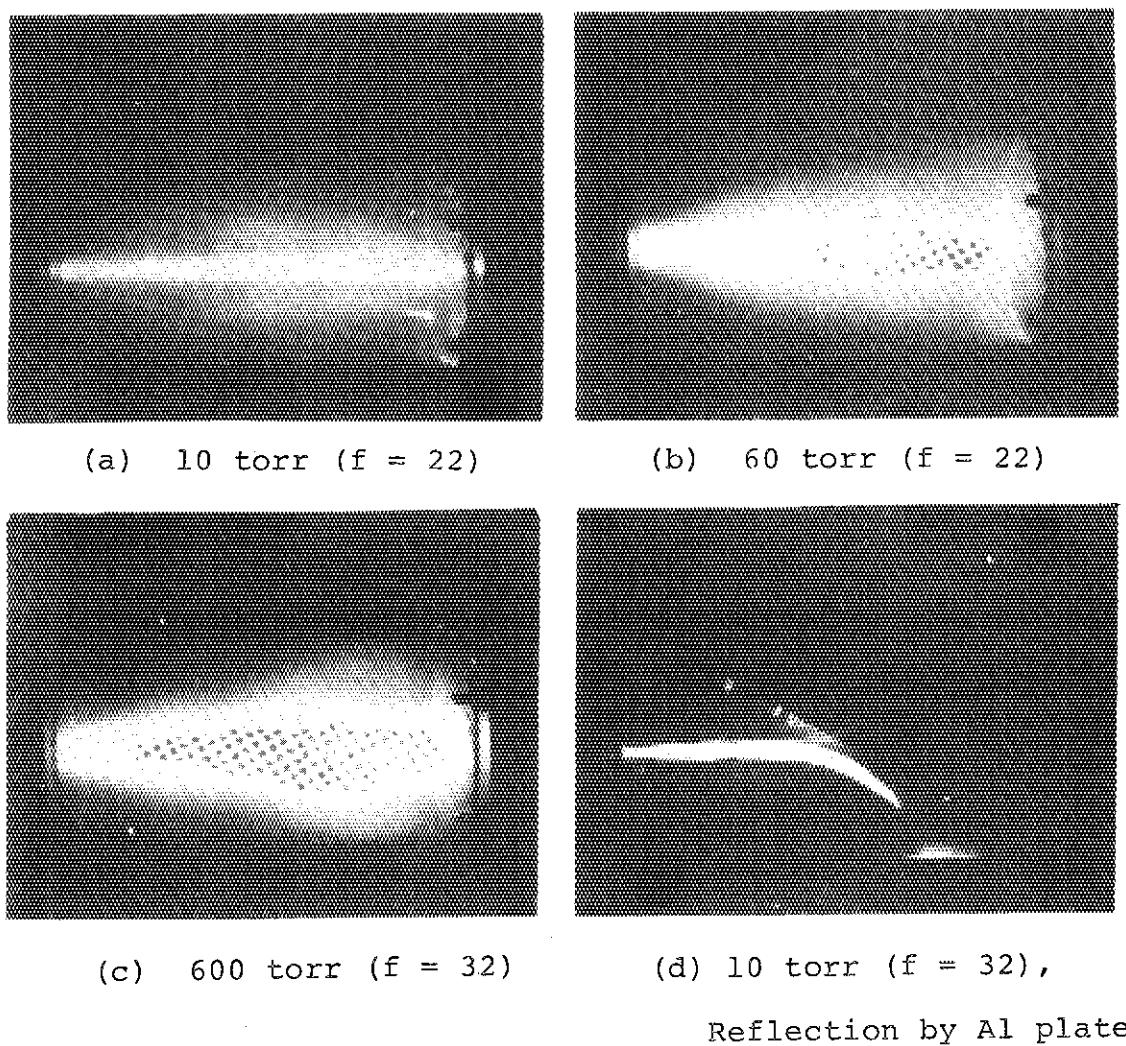


Photo. 1 Photographs of beam profile in helium

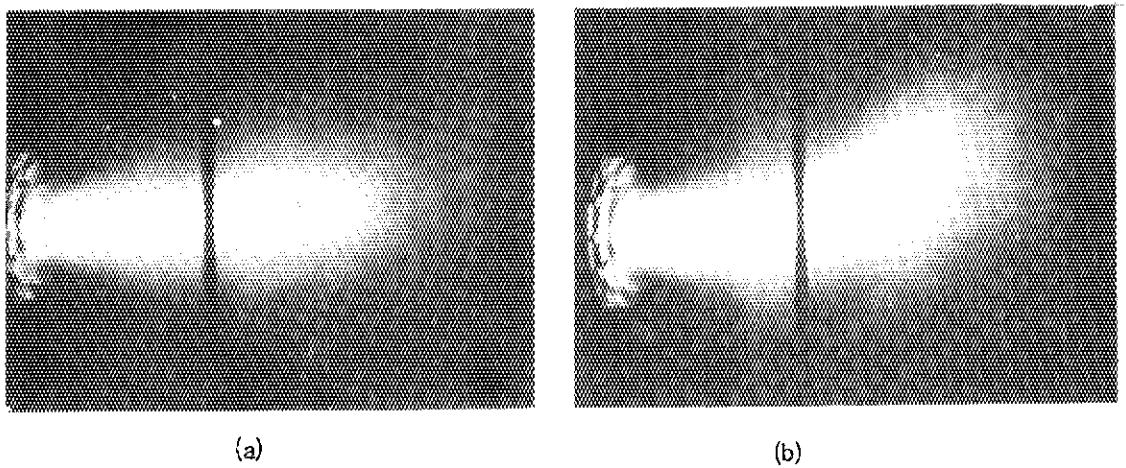
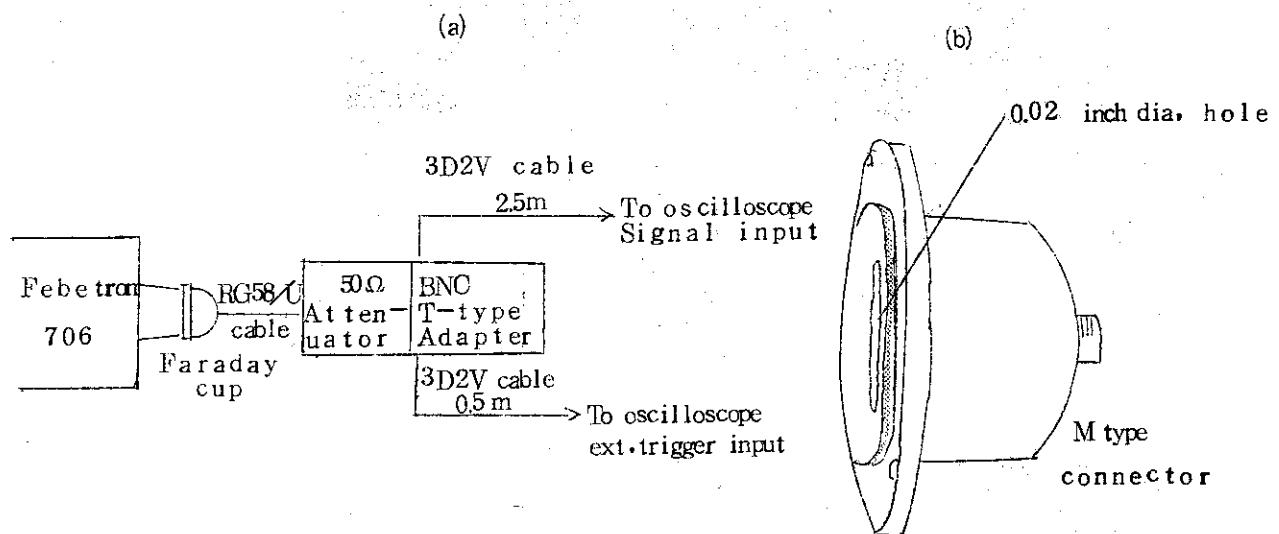


Photo. 2 Photographs of (a) stable and (b) unstable
beam profile in air (760 torr). $f = 4.7$



-Packard 355D

VHF Attenuator)

を入れて信号パルスの調整を行った。単一パルスの測定に適当なトリガー信号を得るために、減衰器のあとにBNCのT形アダプターを用い、一方はオシロスコープの入力端子へ他方はトリガー端子へ接続した。

この場合、両ケーブルの長さを変えて、ケーブル中の信号伝播時間の差を利用して、トリガー信号がオシロスコープに入つてから約10ナ秒後に入力端子へ信号が入るようにした。測定に使用した上記各部は50オームの特性インピーダンス、入力インピーダンスを持つていて測定回路内の反射を極力防ぐように配慮した。この測定で最も大きな問題は雑音であるが、Febetron本体は巾4cmの銅紐を用いて第1種接地工事(接地抵抗3.5オーム)を施した。オシロスコープは厚さ2mmの鉄板でかこんだ。また、カップ全体を本体の先端と共に厚さ20μのアルミニウム箔で一緒に包んだ。Fig.3.2はこのようにして得た結果で、(a)は電子管5515、(b)は電子管5510の場合で、時間軸は10nsec/divであるので、いづれも半値巾は約3nsecとなる。

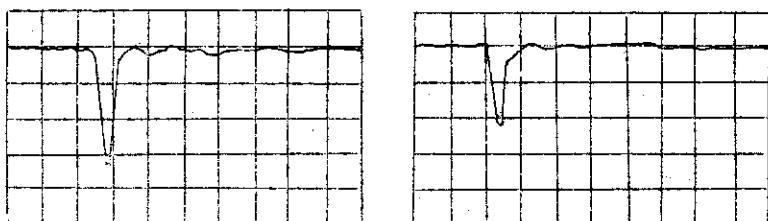


Fig. 3.2 Current density of pulsed electron beam(10 nsec/div).

3.3 热量計によるパルス当りの全エネルギーの測定

入射電子の飛程よりも厚いアルミニウム板(600KeVの電子に対し約1mm)にパルス電子線を照射し、そのときの温度上昇を銅・コンスタン熱電対の熱起電力として記録した。照射後の熱拡散や外部への放熱による温度降下曲線の直線部分を照射時に外挿してそのときの温度上昇が求められる。パルス当りの全入射エネルギー(W)は次式によってJoule単位で求められる。

$$W(J) = 4.186 (J/cal) \times 25 (C/mV) \times \Delta mV \times M \times C_p$$

ここで

ΔmV : 热起電力の増加分(mV)

M : 热量計の質量(g)

C_p : 热量計の比熱でアルミニウムでは $0.22\text{ cal/g}\cdot\text{C}$

热量計として Fig. 3.3 に示すように厚さ 1mm 直径 35mm (2.62g) のアルミニウム板を同材質のホルダーにセロテープで固定し、このホルダーを 3 本のボルトで本体に固定して中心を電子管の中心に合わせた。このようにすれば、十分全エネルギーの測定が可能と考えられる。熱電対の測定点を热量計中で移動しても同じ結果を得た。Fig. 3.4 で(a)は電子管 5515, (b)は電子管 5510 であって、このようにして求めたパルス当りの全エネルギーは前者で 11.9 J, 後者で 9.3 J であった。

なお、以上の計算は電子線の後方散乱に対する補正をしていないが、Berger のモンテカルロ計算の結果によれば約 5%である。³⁾ 一次電子のエネルギー分布やアルミニウム面への入射面への入射角度のひろがりを考慮しても、後方散乱量がこの値から大きくなされることはないであろう。⁴⁾ したがって、Ling らが約 10%と仮定しているのは大きすぎると考えられる。

3.4 2次線量計の条件

熱線量計は主として電子線パルスの全入射エネルギーを測定するためのものであり、吸収線量分布の測定には適さない。後者のためには、被照射媒体の物理的あるいは幾何学的条件に合致した 2 次線量計が必要である。大強度パルス電子線の線量測定に必要とされる、あるいは望ましい条件としては次のことがらが考えられる。

- (1) パルスの持続時間が短いので、積分的な放射線効果の測定が可能であること。
- (2) 電子線の径が細いので、媒体の深部方向ばかりでなく、電子線の方向に垂直な面内での分布が測定可能のこと。たとえばミクロフォトメータの走査測定などで。
- (3) 線量率依存性のないものが望ましい。一般に使用されている低線量率領域の電子線に対する線量応答は Febetron のような超高線量率パルス電子線に対して必ずしも等しくない。
- (4) 10^4 rad 付近から 10^7 rad 付近までの広い線量範囲にわたって測定できることが望ましい。
- (5) Febetron 706 のような電子の飛程の比較的短い電子線に対しては、線量計自身が小さいもの(あるいは薄いもの)であることは深部線量分布測定の分解能をよくするために必要である。
- (6) 被照射媒体の実効原子番号に等価であることが望ましい。Solid cavity chamber と

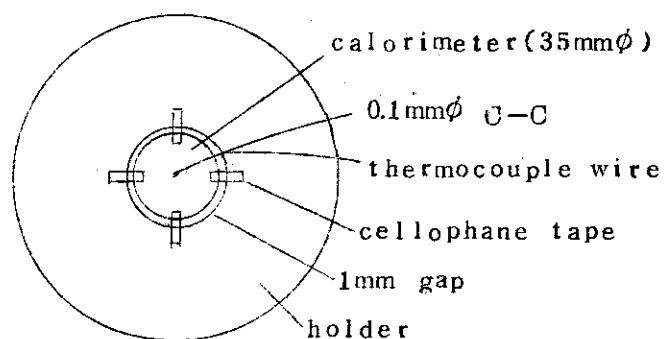
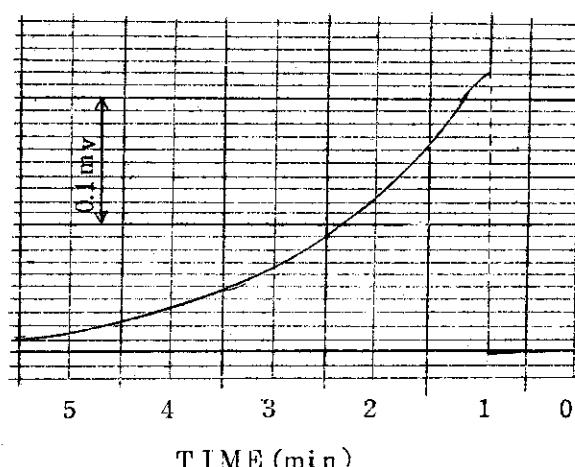
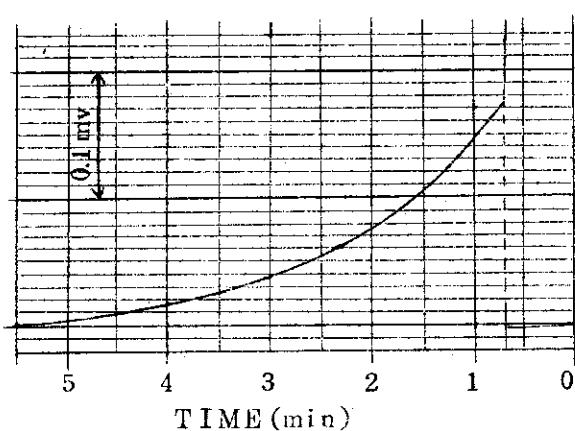


Fig. 3.3 Aluminum calorimeter assembly



(a) Tube 5515



(b) Tube 5510

Fig. 3.4 Records of typical cooling curve for the aluminum calorimeter.

して用いる場合は，Febetron 706 のような電子の飛程の短い場合は線量計の大きさ（あるいは厚さ）を媒体の厚さに比して無視し得るほどにすることとは実際上困難である。

その他，線量に対する直線的応答性，経時変化や温度や湿度などの環境条件に依存しないこと，再現性など一般的に要求される条件があげられる。

以上のことから言えることは，Febetron 706 からのパルス電子線の線量測定に適した方法は，従来のコバルト 60 ガンマ線や電子線の大線量測定の場合に比して，さらにきびしい条件が要求される。これらの条件をすべて満たす線量計は存在しないが，本報ではこのために検討したいいくつかの線量計について述べる。

現在のところ比較的諸条件を満足するものとしてプラスチック線量計と熱蛍光線量計（TLD）があげられる。TLD の利点は感度が非常に高いことと線量率依存性がないと言われていることであるが，現在市販されているものは 10^6 rad 以上の測定は不可能である。さらに欠点として，線量に対する直線的応答性がないこと，(2)の条件を満足しにくいこと，超薄型の特殊な蛍光体は非常に高価であることなどがあげられる。

一方，特定波長での吸光度変化を利用したプラスチック線量計は 10^5 rad 以上の大線量の測定に適していて，現在多数のものが使用されているが，(2)，(5)の条件を満たすものはわずかである。特にミクロフォトメータは通常近紫外部での吸光度測定が難しいので，可視部の吸光度の変化を利用したブルーセロファン線量計と Radiochromic dosimeter に制限される。

3.5 ブルーセロファン線量計

ブルーセロファンは古くから線量計として用いられているが，現在用いられているフィルム線量計の中で最も薄く 25μ で，照射後の吸光度の経時変化がない。欠点としては，線量に対する直線性がないこと，広い線量率範囲で線量率依存性があること，測定可能な線量範囲が $10^6 \sim 10^7$ rad に限られること，フィルムの染色が必ずしも一様でないため測定値の再現性がよくないなどがあげられる。線量率依存性は Febetron からのパルス電子線のみに限れば誤差の原因にはならない。また，感度の悪いことはパルスの発数を多くすることによって補うことができる。

この研究に用いたブルーセロファンは AVISCO 195 CMS Light Blue Cellophane である，Henley と Richman⁵⁾によれば Du Pont ののは dimethoxydiphenyl biazobis-8-amino-1-naphthol-5, 7-disulfanic acid dye をふくんでいる。

3.5.1 ブルーセロファンの線量較正

Febetron 706 からのようだ大強度パルス電子線に対するブルーセロファンの線量較正は一般に使用されている大線量加速器からの電子線に比べて次の点でかなり面倒である。

- (1) アルミニウム板による熱量測定による全入射エネルギーを基礎としなければならないのでアルミニウム中の相対的深部線量分布をブルーセロファンを用いて測定しなければならない。
- (2) ブルーセロファンは線量に対する直線的応答を示さないので，相対的深部線量分布を求めるのに，面倒な間接的方法をとらなければならない。
- (3) ビームが細いので，半径方向の強度を積分して平均化しなければならない。
- (4) 自己集束性のためピンチされたビームは不安定のため再現性が悪い。

これらのこと考慮して次のような較正作業を行った。まづ横軸を任意の相対線量(この場合パルス発射数)で目盛った線量依存性を求め、次にアルミニウムとブルーセロファンを交互に積み重ねた多重層にパルス電子線を照射し、その結果からの相対線量を積分して得られた全吸収エネルギーの相対値を、熱量測定による全吸収エネルギー規格化して絶対線量を求めた。すなわち、ブルーセロファンの較正定数は規格化定数として考えられる。

Fig.3.5はパルスの発射数とともにブルーセロファンの655nmにおける吸光度がどのように変化するか

を示してある。ブルーセロファンは空気中に電子線軸に垂直に置いて照射した。電子管の窓から近距離で照射すると、パルス1発当たりの吸光度変化が大きすぎて正確な線量依存性の曲線が得られない。

一方、遠距離では3.1で述べたように再現性が悪くなる。そこで、厚さ 30μ のステンレス箱を散

乱体として電子管の窓を遮蔽して強度を適当に弱め、ブルーセロファンは5cmのところに置いて繰返し照射を行った。この散乱体のために電子線は軸の垂直方向に強度が平滑されて、後に述べるFig.3.14(B)のような形になった。Fig.3.5に一緒に散乱体がない場合の値を△印で記入し、散乱体がある場合と曲線が円滑につながるように横軸の目盛を調整して、線量が大きくなつた場合の曲線としている。この場合はFig.3.14(A)のようになるので走査曲線の最大変化値をとつてあるが、この場合は相対的変化曲線を問題としているので問題はない。吸光度変化のはらつきは最大 $\pm 10\%$ 程度のように見えるが、これは繰返しパルスの再現性以外に、ブルーセロファン自体の誤差やミクロフォトメーターの測定誤差も含まれている。各点を結ぶ最適曲線は吸光度変化を変数とする4次のべき関数の形で経験式化し、相対線量の計算に用いた。

次に、Fig.3.6に示すようなアルミニウム箔(15.7 mg/cm^2)とブルーセロファン(3.8 mg/cm^2)を交互に積み重ねた多重層線量計を電子管の窓から5cmの点で照射し、縦軸を相対線量で表わしたブルーセロファンの深部線量分布をFig.3.7のようにして得た。各深さにおけるブルーセロファンの面内における線量分布は、細くピンチされた電子線が不安定なため再現性がよくないので、電子管の窓に 30μ のステンレス箱を散乱体として用いた。これによりアルミニウム熱量計($10\text{ mm}\phi$)の面積に相当する電子線の中心領域における線量はほとんど均

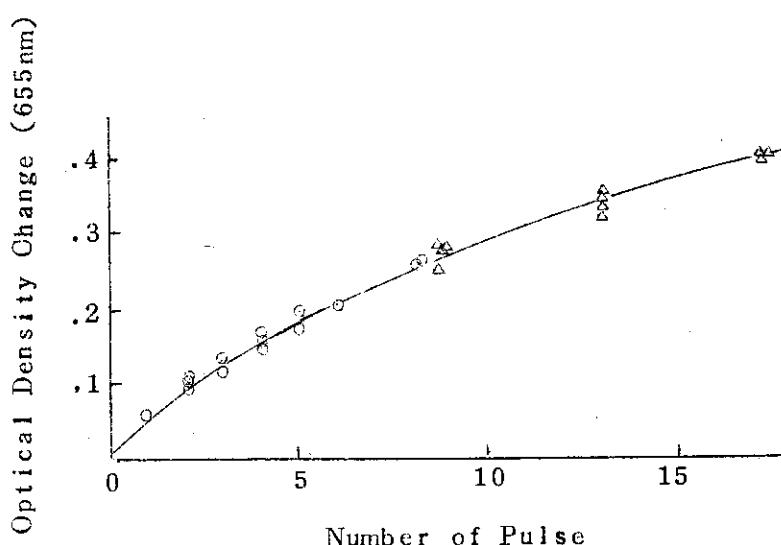


Fig.3.5 Optical density change of blue cellophane at 655 nm as a function of the number of pulse. See the text for triangles.

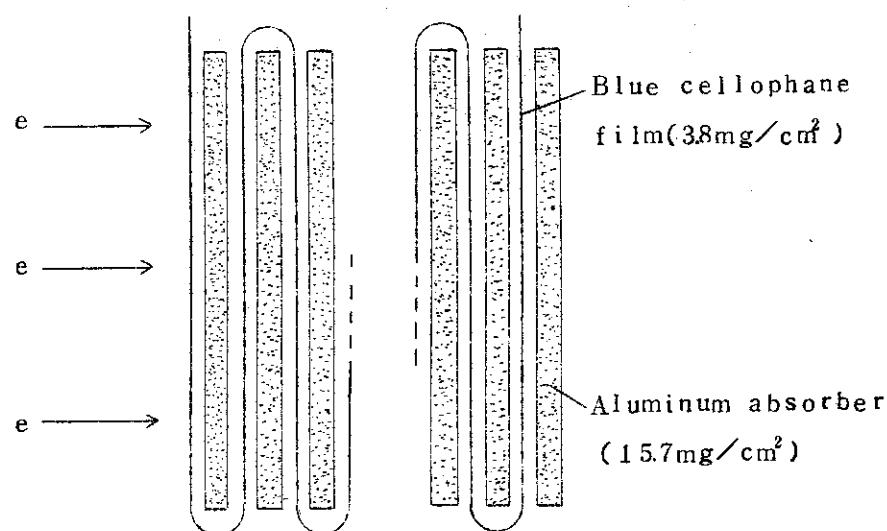


Fig. 3.6 Aluminum-blue cellophane dosimeter

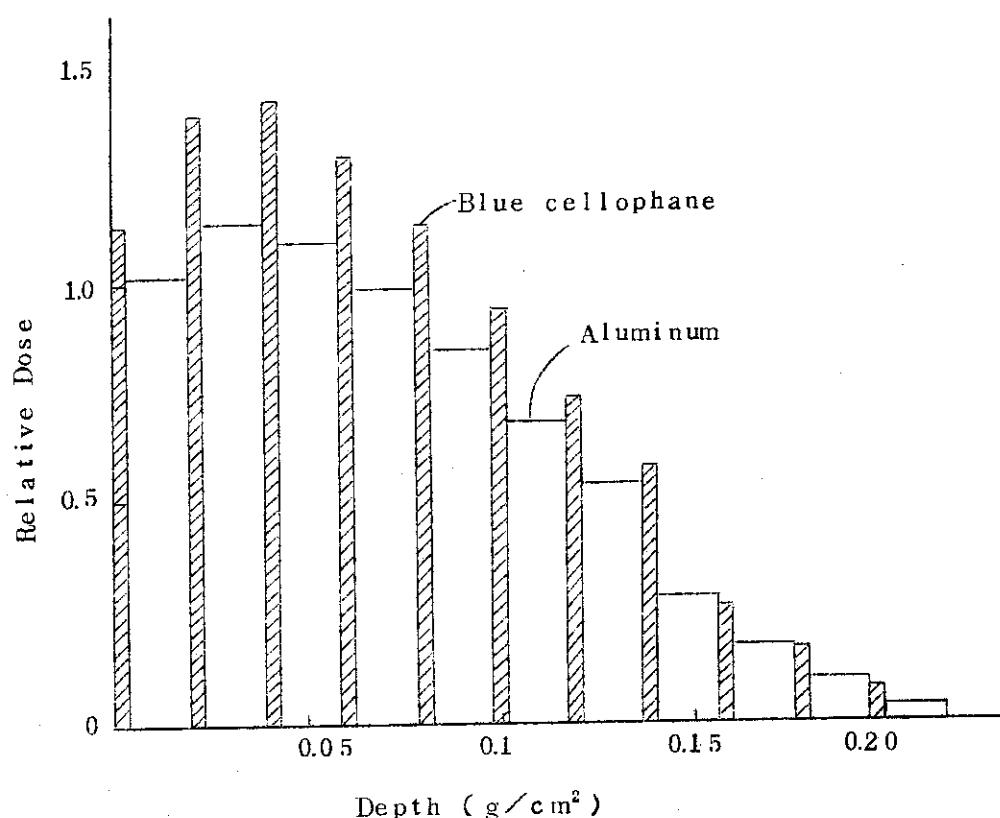


Fig. 3.7 Depth-dose distribution in aluminum-blue cellophane multilayer dosimeter in arbitrary scale.

一になり、再現性は改善された。

この多重層線量計の表面から i 番目のセロファンの相対的線量を J_i 、セロファンの面積密度を X_c (g/cm^2)、 1 Mrad あたりの相対線量 (Fig. 3.5 の横軸の目盛) を M とすると、入射バルス電子線のエネルギーのうちセロファンに吸収されたエネルギー W_c は

$$W_c = \frac{X_c}{M} \sum_{i=1}^n J_i \times 10^8 \quad (\text{erg/cm}^2) \quad (1)$$

となる。これに対して i 番目のアルミニウム箔による吸収エネルギー $W_{Al,i}$ は前後におけるセロファンの吸収エネルギーの平均値を用いて

$$W_{Al,i} = \frac{S \cdot X_{Al}(J_i + J_{i+1})}{2M} \times 10^8 \quad (\text{erg/cm}^2) \quad (2)$$

で表わされる。ここで S はブルーセロファンに対するアルミニウムの電子の阻止能比、 X_{Al} はアルミニウム箔の面積密度である。

阻止能比 (S) は電子エネルギーに一定程度依存するので、多重層中のエネルギー減衰を考慮すると、厳密な値を求めることが難しい。したがって、ここでではエネルギーが 0 まで減衰する過程における平均阻止能比を全部のアルミニウム薄層に対して適用した。平均エネルギー阻止能比は Laurence の方法によって次式から求められる。

$$\frac{1}{S} = \frac{(Z/A)_c}{(Z/A)_{Al}} [1 + C_{Al}(T_0) \ell_n \frac{I_{Al}}{I_c} + d_{Al}(T_0)]$$

ここで、 Z 、 A はそれぞれ原子番号と原子量、 $(Z/A)_c$ はブルーセロファンの Z/A の平均値、 I_{Al} はアルミニウムの平均電離ポテンシャルで 164 eV 、 I_c はブルーセロファンのそれで 840 eV である。また、 C_{Al} と d_{Al} は電子の初期エネルギー T_0 の関数として得られている。これらの値を入れると S は 0.813 となつた。

したがって、アルミニウムの全吸収エネルギーは次式で表わされる。

$$W_{Al} = \frac{S \cdot Z_{Al} \{ J_1 + 2 \sum_{i=2}^n J_i \}}{2M} \times 10^8 \quad (\text{erg/cm}^2)$$

同じ位置にアルミニウム板 ($1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \phi$) を置いて熱量測定を行い、そのときの吸収エネルギーを W_0 (erg/cm^2) とすると

$$W_0 = W_c + W_{Al}$$

が近似的に成立つ。この場合、アルミニウム・ブルーセロファン多重層のエネルギー後方散乱係数はアルミニウムのみのときのそれと近似的に等しいと仮定した。上記の関係から較正定数 M は次式で得られる。

$$M = \frac{\{ 2X_c \sum_{i=1}^n J_i + S \cdot X_{Al} (J_1 + 2 \sum_{i=2}^n J_i) \}}{2W_0} \times 10^8 \quad (\text{Mrad}^{-1})$$

計算の結果 M は 0.38 となつた。

吸光度変化 A と吸収線量 D (Mrad) との関係は近似的に Febetron 706 V 対しては次の経験式で表わされる。

$$D = 331A^4 - 197A^3 + 65.9A^2 + 9.12A$$

この関係式は Febetron 706 からの電子線のような超高線量率領域ばかりでなく、数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の照射密度をもつ普通の直流電子加速器の場合にもほとんど同じ較正曲線が得られたので、非常に広い領域にわたつて線量率依存性がないものと思われる。しかし、Mrad/hr 領域のコバルト 60-γ 線に対しては、単位線量あたりの吸光度変化は電子線の場合よりもかなり小さく、このような低線量率領域では線量率依存性がある。

3.5.2 空気線量分布および電子束分布

電子管 5515 を用いたときの大気中での電子線ドリフト場中の線量分布はブルーセロフアンを電子線の方向に垂直に置いて測定することによって得られる。これから、セロフアンの置かれた位置における空気の線量はセロフアンに対する空気の阻止能比 (600KeV の電子線に対して 0.934) を用いて決定される。電子線方向に垂直な面内での空気線量分布を電子管の窓からの距離をパラメータとして Fig.3.9 に示した。各分布の最大値と電子管の窓からの距離との関係を Fig.3.10 に示した。電子管の窓から 3 ~ 4 cm までは電子線の強度は減衰するが、その後一時的に増加し、5 cm 付近に極大点が見られる。これは一次電子線自身によって誘起された磁場によって生じるピンチ効果によるものである。この様相は媒体気体の圧に強く依存することは Photo.1 でも示した通りである。各強度分布の半値巾と電子管の窓からの距離との関係を Fig.3.11 に示した。15 cm の距離までの半値巾は 10 ~ 13 mm でほぼ一定で変化しない。このことはピンチ効果による電子線の自己集束性を示している。Fig.3.10 のように、5 cm 付近で特に集束しているが、これは Graybill ⁷⁾ ら述べているようにピンチされた電子線中の電子が横方向の振動によって生じた node と考えられる。Fig.3.12 に、20 mm のアルミニウム板による熱量測定によって求められた吸収エネルギーと電子管の窓からの距離との関係を示した。この場合、アルミニウム熱量計の径が十分大きいので、5 cm で副次的なピークは見られず、距離に対して単調に減衰している。参考のために電子管 5510 を用いた結果も示したが、電子管 5515 に比して電子線の強度はかなり小さい。

電子線の電子束 (Particle flux) やエネルギー・フルエンスは原理的にはフアラデーカップによる電荷測定から求められるが、実際にはかなり面倒で、ドリフト場にガスが存在する状態では信頼ある測定は難しい。しかし便宜的な方法として照射野に置かれたブルーセロフアン線量計の測定結果から推定し得る。すなわち、パルス当たりの電子束の (cm^{-2}) は近似的に次式で与えられる。

$$\phi = 0.625 \times 10^8 \times D_c \cdot \left(\frac{dE}{dx} \right)_c^{-1}$$

ここで D_c はブルーセロフアンの吸収線量 (rad), $(dE/dx)_c$ はブルーセロフアンの質量衝突阻止能で 600KeV の電子に対して 1.95 MeV/g cm^2 である。この式では 600KeV の単一エネルギーをもつた電子線がブルーセロフアンを垂直に通過するという単純な仮定をしている。しかし実際にはかなり低エネルギー成分をふくんだ分布を Febetron からの電子線はもっているので、600KeV に対する阻止能よりも実際

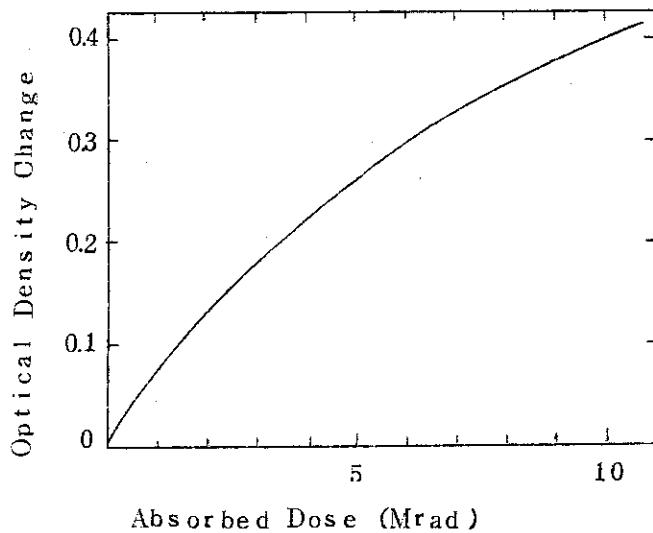


Fig. 3.8 The calibration curve of absorbed dose from the optical density change of blue cellophane at 655 nm.

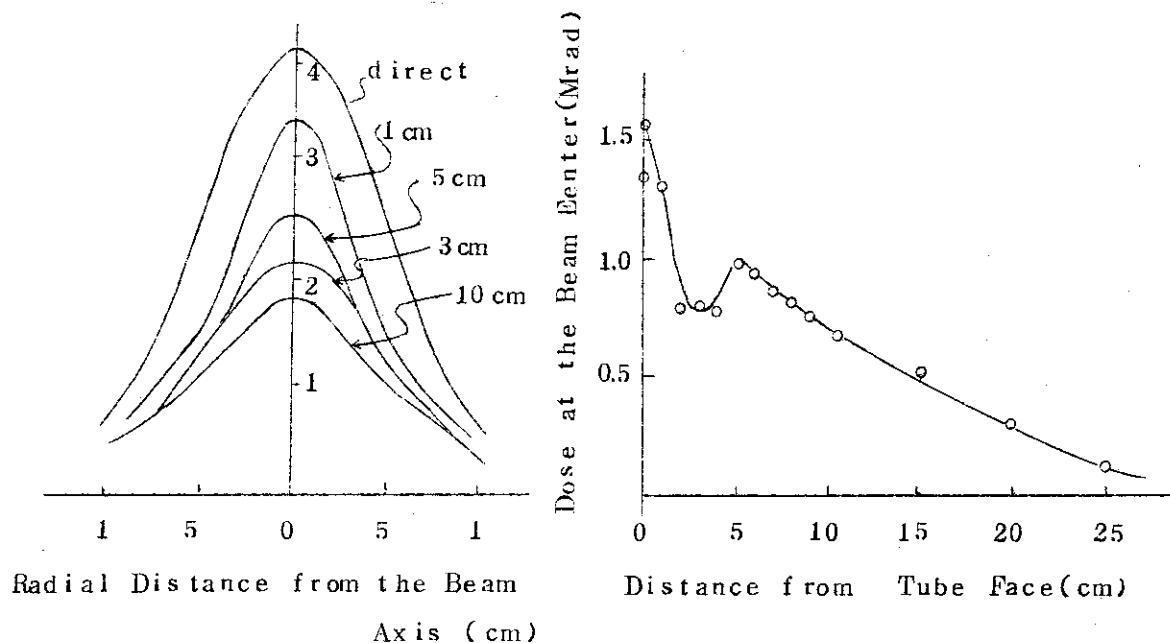


Fig. 3.9 Radial air dose distributions at respective distances from the tube face.

Fig. 3.10 Dose at the beam axis as a function of distance from the tube face.

には低い値であると思われる。またピンチ効果のもとで電子は電子線の進行方向に対して横方向成分の振動が大きいので、電子はセロファンを斜めに通過することになる。⁸⁾したがってこの式よりも高めの値が実測される。このことは、この式からの ϕ と熱量計からの W_0 とから得られる電子の平均エネルギー $E = W_0 / \phi$ が、フアラデーカップによる測定と熱量計からの測定値から得られるものよりもかなり低めの値を与えることからある程度認められた。しかし、このようなブルーセロファンによる電子束の測定は局所的な電子束の簡便な測定法あるいは電子線強度のモニタリング法としては十分有効であろう。

3.5.3 深部線量分布

近似的な深部線量分布は、Fig.3.6に示したアルミニウム一ブルーセロファン多重層線量計をFig.3.13に示す照射容器の中心軸上に置いて照射して測定した。この照射容器は3.1の電子線の拡がりの写真撮影に用いたものすでに説明した通りである。電子管の窓とこの窓との間隔は8mmであった。ブルーセロファンのリボンを引きのばしてミクロスペクトロフォトメーター(ナルミ製)で走査して655mmでの吸光度を照射前(a)と照射後(b)に測定するとFig.3.14に示すような曲線が得られる。(A)は収集した電子線、(B)は発散した電子線の例である。吸光度変化の極大値をその深さにおける深部線量の計算するための値として用了いた。

この多重層のうちブルーセロファンの占める厚さ(面積密度)の割合は全体の1/5程度もあるので、厳密な意味ではアルミニウム中の深部線量分布とは言い難い。これはブルーセロファンの阻止能がアルミニウムよりも約20%大きいのと、多重散乱がアルミニウムよりもかなり小さいなどによるものであるが、これらは深部線量分布へ与える影響は測定誤差範囲にふくまれると考えられる。

電子管5515からのパルス電子線の空気中に置かれたアルミニウム中の深部線量分布を電子管の窓からの距離をパラメータとして示すとFig.3.15のようになる。0.6cmでの曲線の飛程付近の値から推定される電子の最大エネルギーは約600KeVである。しかし、600KeVの単一エネルギーの電子線に対する曲線よりもピークの深さが浅くなっている。これは、電子の巾広いエネルギー分布のうちの低エネルギー成分の寄与によることと、前に述べたピンチ効果特有の横成分の振動のために斜め入射の寄与がかなり増加していることが考えられる。

照射容器中の空気圧を0.01 torrにして同様な測定を行うとFig.3.16に示す結果を得た。5cmと10cmにおける値は小さかったのでパルス10発に対する値を示してある。これらの曲線の極大値を電子管の窓から距離の関数として示すとFig.3.17のようになる。0.01 torrでの減衰が急激なのは、ピンチ効果(自己集束性)がほとんどないばかりではなく、電子相互間の反発力のために電子線が横方向に拡散するためである。760 torrでは5~10cm付近に弱いピークが認められるが、これはFig.3.10やFig.3.11で認められた特異現象と同様にピンチ効果のためである。しかし、この現象の現われる位置は今度の方が少し深い方へずれている。

Fig.3.15でもFig.3.16でも電子管からの距離が離れると電子の飛程(Projected range)が減少する傾向がみられる。この現象は0.01 torrでも起きているから、これが空気中での衝突によるエネルギー損失によるものでないことは明らかである。これは大強度パル

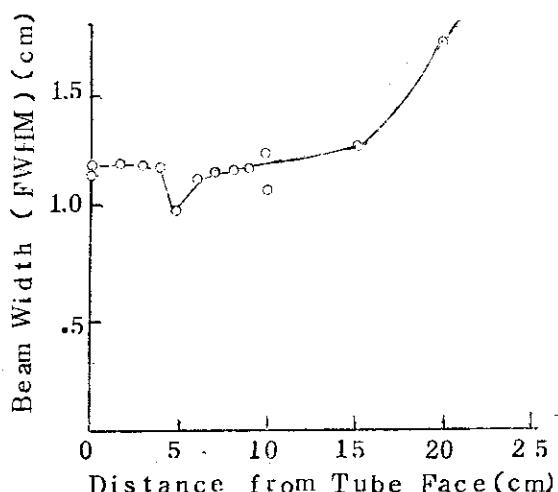


Fig. 3.11 Beam widths as a function of distance from the tube face.

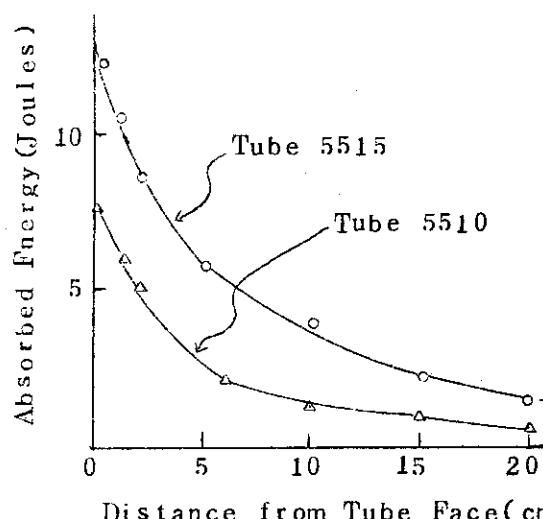


Fig. 3.12 Absorbed energy, measured by aluminum calorimeter ($2\text{cm}\phi$) as a function of distance from the tube face. Charging voltage 29 kV.

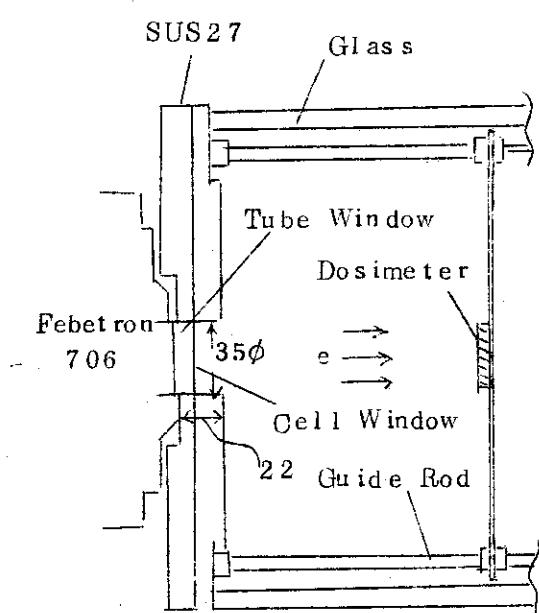


Fig. 3.13 Irradiation cell.

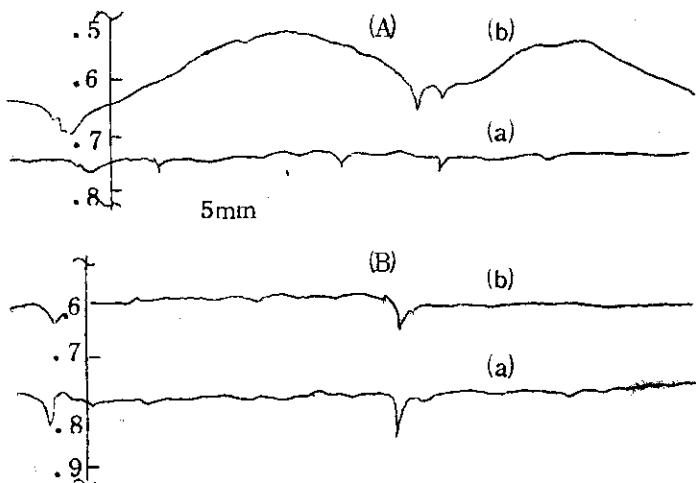


Fig. 3.14 Typical scanning curves of optical density of a blue cellophane ribbon at 655 nm
 (a) before and
 (b) after irradiation:
 (A) focused beam and
 (B) defocused beam.

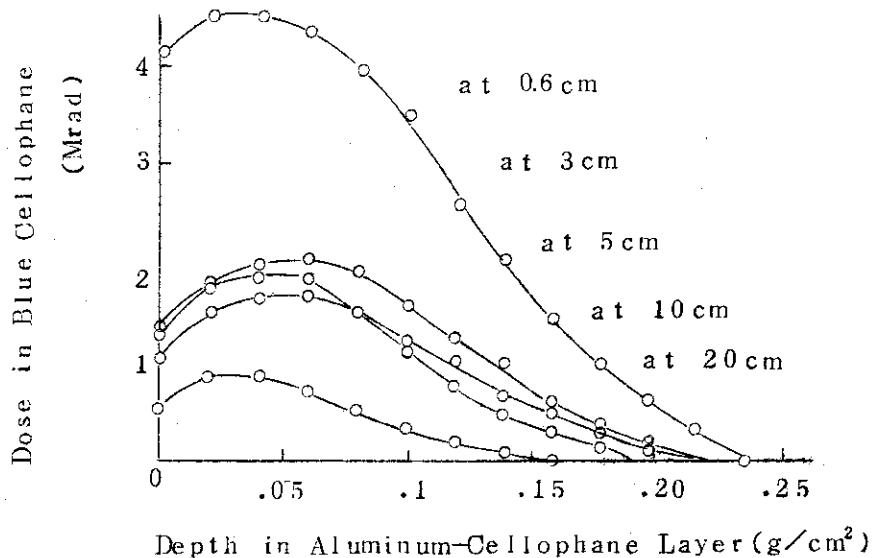


Fig. 3.15 Depth-dose distributions in aluminum-blue cellophane multilayer in air at STP at various distances from the tube face.

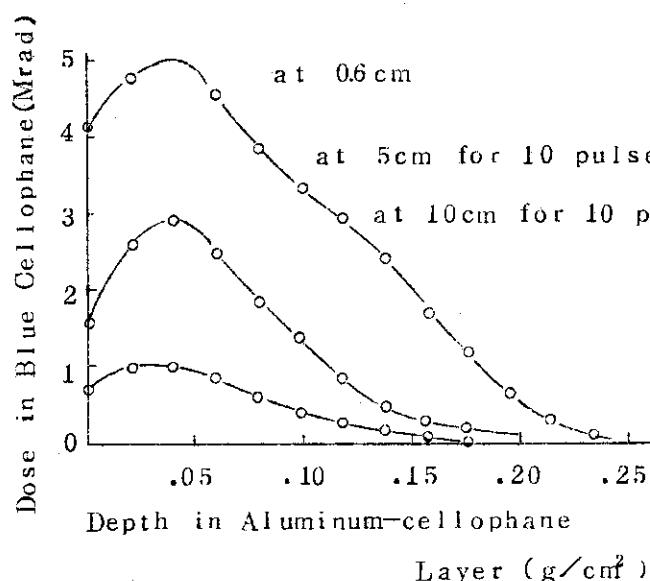


Fig. 3.16 Depth-dose distributions in aluminum-blue cellophane multilayer in 0.01 torr of air at various distances from the tube face.

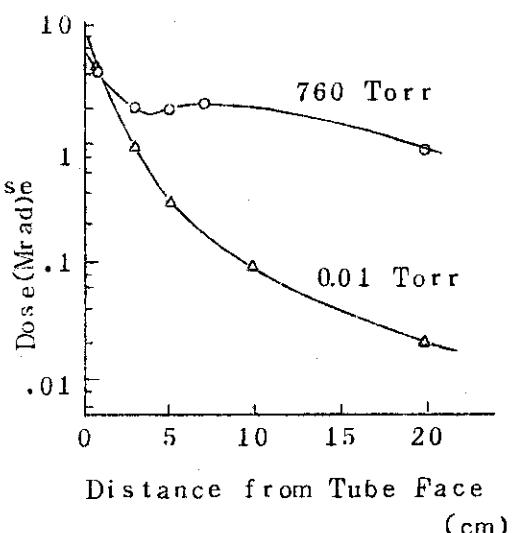


Fig. 3.17 Maximum dose in depth-dose curves as a function of distance from the tube face, measured in air.

ス電子線特有の現象で、ヘリウム中で圧力を変えて詳しく研究した結果は別に Radiation Research に投稿した。

3.6 その他の2次の測定法

ブルーセロファン線量計が Febetron からのパルス電子線の吸収線量の測定に現状では最も適しているようであるが、測定線量領域、非直線的応答、再現性などで欠点がある。そのため補助的手段として他の線量計を用いる必要がしばしばあるので、そのために検討した結果をここにまとめる。

3.6.1 熱ルミネッセンス線量計 (TLD)

最も一般に使用されている LiF 線量計はだいたい 10^5 rad 以下の領域で測定可能である。 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ や CaF を用いても 10^6 rad 以上の測定は難しい。ここでは、最もよく使用されている Teledyne Isotope の社の Phosphor-Teflon-Dosimeter の Febetron 706 に対する適用度を検討してみた。この場合電子線エネルギーが比較的低いため、0.4mm の厚さのディスク型や 1mm のロッド型のものでは深部線量分布の測定はできない。厚さ 0.1~3mm のディスクならば、それ自身を重ね合せて照射することにより深部線量分布が測定可能である。しかし、細い電子線の中で用いるにはサンプルの面積を小さく切って使用する必要がある。アルミニウム中あるいは原子組成の異つた媒質中の深部線量分布を Solid Cavity chamber としてこれを用いて測定するためには、それより薄い超薄型の UT-LiF-7 (厚さ約 20μ , 約 1.5 mg/cm^2) を用いなくてはならない。この料料の厚さのはらつきが大きかったので、一つ一つの重量を測定し、測定値を補正する必要があつた。電子線強度の非常に弱いところの深部線量分布の測定にはこの方法が最も有效である。また、後に 4. で述べる制動放射 X 線の測定は電子線の場合のような面倒な問題がないので、最も使いやすい TLD を用いればよい。

線量率依存性については、コバルト 60 の γ 線のような低線量率領域から相当な高線量率領域まで依存性がないと言われているが、Febetron 706 を用いて十分確証していない。しかし、ブルーセロファン線量計との簡単な比較から依存性はほとんどないようである。欠点としては、ブルーセロファンの場合のように試料間のはらつきが大きいことと、線量に対しての非直線的応答性である。

3.6.2 Radiochromic dosimeter

Radiochromic dosimeter は Far West Technology 社製のフィルムで、aminotri-phenyl methane dye cyanide をナイロン中に分散させた厚さ 50μ の白色フィルムで、照射すると青色に変色する。照射後 600nm での吸光度変化は 1Mrad 付近まで直線的に増加するが、それ以上では非直線的応答となるが、 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^6$ rad にわたつて測定可能である。線量率依存性がないことと、照射後の経時変化がほとんどないことなどの利点のほかに、電子線に対して比較的高感度で着色するので、肉眼による大体の線量値の判定や電子線の照射位置の検出に便利である。ミクロ フォトメーターで走査した測定結果はブルーセロファンに比してノイズが小さい。しかし 2~3 の使用結果から判断すると、試料間のはらつきがブルーセロファンよりも大きいようである。フィルムの厚さが 50μ もあるので、ブルーセロファンのように Solid cavity chamber として Febetron からの電子線の深部線量分布測定をするには

厚すぎる。この線量計が相当高価であることも欠点といえよう。

3.6.3 PETP 線量計¹⁰⁾

Polyethyleneterephthalate (PETP) のフィルム(東レ・ルミラー, 100μ, 1.4mg/cm²)は 5×10^6 rad 以下の測定が難しいので, Febetron からの電子線の測定にはあまり適当でないが, 低原子番号の媒質中の深部線量分布を知る意味で測定を行った。Fig. 3.1.8 と Fig. 3.1.9 はそれぞれ電子管 5515 と電子管 5510 に対する PETP フィルムの積層内における 1 パルス当りの相対的な深部線量分布である。縦軸は照射 10 分後の 330 nm での吸光度変化から求めたビーム方向の幾何学的中心部における相対線量である。ミクロフォトメーターが測定波長範囲の関係で使用できないので普通の紫外分光光度計で測定した。電子管の窓から遠くなると強度が弱くなるので, パルス発射回数を多くして吸光度変化が一定になるよう調整した。測定点がばらついているのは, ビーム方向の幾何学的中心が最大強度を示さないことや, 分光光度計の分光光線のスリット巾がかなり大きいためであつて, ブルーセロファンの場合の測定結果よりも信頼性がよくない。

電子管 5515 に対する電子の飛程は, 電子管の窓から 2 cm の点に関する限り, アルミニウム-ブルーセロファン多重層中の飛程 (2 cm のデータはないが, 0.6 cm と 3 cm でのデータから推定して) とほとんど同じであり, 極大点の深さもほとんど同じであることがわかった。距離が離れると極大線量の 5 ~ 10 cm 付近での減少の仕方が Fig. 3.1.5 のそれと一致していないが, これは両方の実験の間に電子管が交換されたためであろう。しかし, 飛程の減少の傾向は Fig. 3.1.5 と Fig. 3.1.8 で大体一致している。電子管 5510 に対する電子の飛程は電子管 5515 よりもかなり小さく, その最大エネルギーは飛程から求めると約 500 KeV である。

3.6.4 PMMA 線量計¹¹⁾

厚さ 1 mm の Clear PMMA (Polymethyl methacrylate, 三菱樹脂, アクリライト) および厚さ 2 mm の Red PMMA (住友化学, スミベックス) は前述のフィルム線量計に比して厚すぎる所以, Febetron からの電子線の深部線量分布の測定は不可能である。しかし逆に厚いことを利用して, 電子線の強度分布の測定には有効である。問題となる欠点は, 両者とも電子管の窓の近傍の強い電子線密度のところでは照射によりリヒテンベルク放電图形ができるので, 測定不可能になることがある。この現象は Red PMMA の方がより一層生じやすい。一方, clear PMMA は 290 nm での吸光度の変化を測るので, 通常のミクロフォトメータによる走査測定ができないが, Red PMMA の測定波長は 635 nm なのでそれが可能である。Red PMMA の厚さは 600 KeV の電子の飛程よりもわずかに長いので, 入射電子はすべて吸収される。したがって, 热量測定で線量較正を行えば, ブルーセロファンよりも信頼できる正確な電子線強度分布が得られる。ミクロフォトメータにより走査測定する際の吸光度分布曲線のノイズは Red PMMA が最も小さい。通常用いいる線量率領域と Febetron からの電子線のような高線量率領域の間では線量率依存性はほとんど認められなかった。

3.6.5 コバルトガラス線量計

PMMA 線量計のようにコバルトガラス線量計で強度分布の測定が可能であるが, PMMA 線量計よりもかなり低い線量領域まで測定可能である。コバルト 60-γ 線の場合, 最大 10^6 rad まで測定可能であるが, 600 KeV 程度の低いエネルギーの電子線に対しては 1.5 mm の厚さの

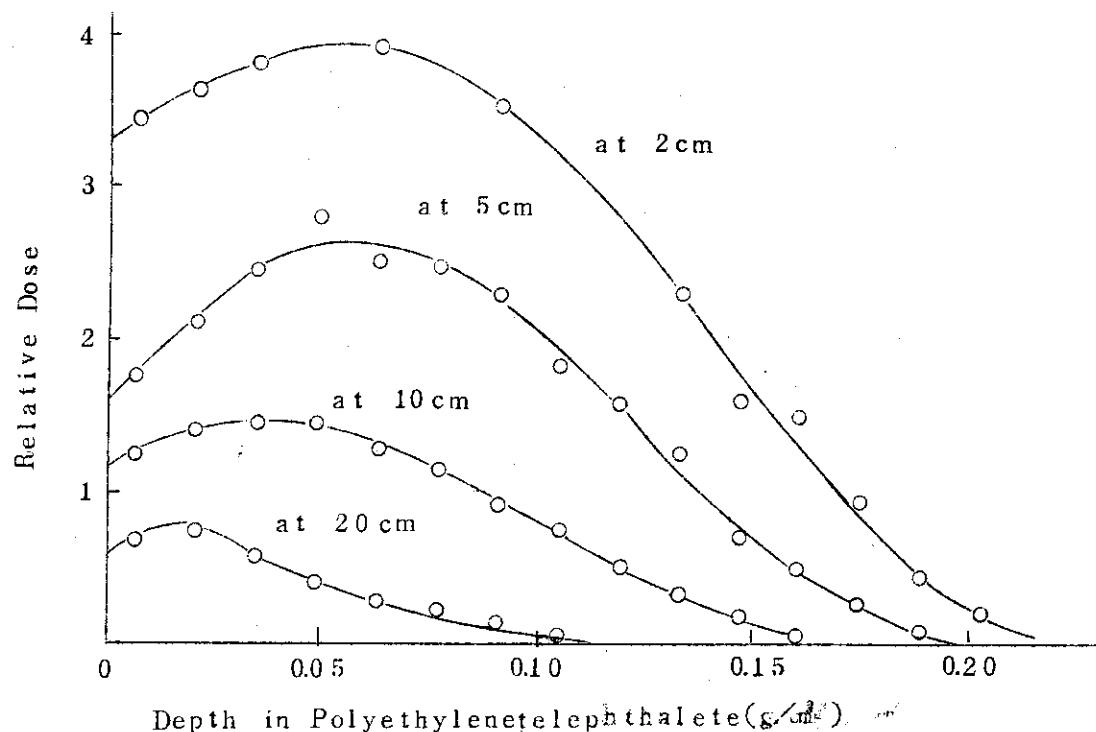


Fig. 3.1.8 Depth-dose distributions in polyethylenetephthalate at various distances from the tube face, measured in air (Tube 5515).

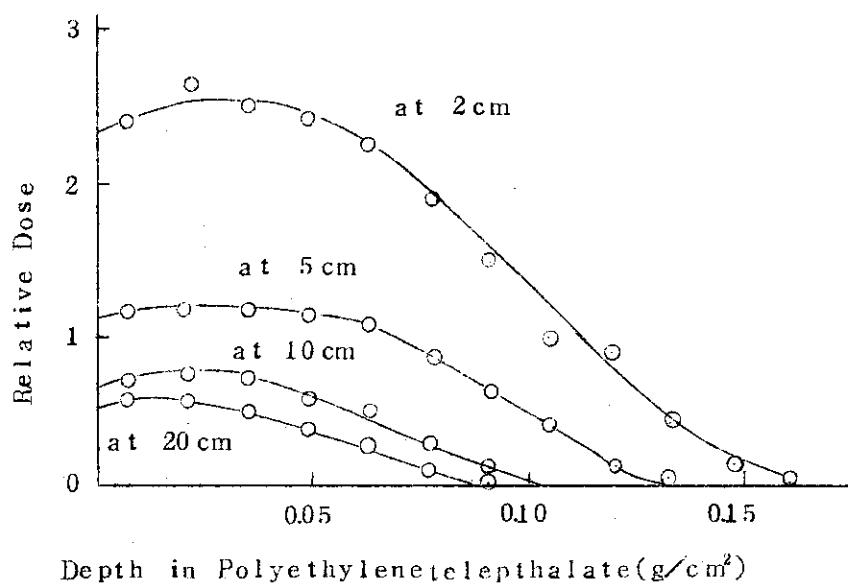


Fig. 3.1.9 Depth-dose distributions in polyethylenetephthalate at various distances from the tube face, measured in air (Tube 5510).

コバルトガラスの内部に線量分布が形成されるために， 2×10^5 rad 以上の非直線的応答の領域では，たとえ線量率依存性がなくても，コバルト 60-γ 線用の線量較正曲線を使用することができない。PMMA 線量計では測定不可能な低強度領域の測定にはコバルトガラス線量計は有効であろう。

4 制動放射 X 線の空間分布

発射されたパルス電子線の挙動は 3 で述べた通りであるが，この電子線がターゲットにあたつて発生する制動放射 X 線について検討する。電子線（エネルギー E_0 ）を十分吸収する厚さ（600KeV の電子線の飛程は約 200mg/cm^2 ）をもつた物質（原子番号 Z）を通過するときの制動放射 X 線（エネルギー E_{rad} ）の制動放射率 ϵ は次の式で与えられる。

$$\epsilon = \frac{E_{\text{rad}}}{E_0} = \frac{1.98 \times 10^{-4} (1.96 E_0 + 2) Z}{1 + 0.35 \log_{10} (82/Z)}$$

従って 600KeV の電子線に対する ϵ は次のようになる。

ターゲット物質	Pb	Au	W	Cu	Fe	Ti	Al
原子番号	82	79	74	29	26	22	13
$\epsilon (10^{-2})$	5.5	4.94	4.57	1.57	1.39	1.16	0.64

電子線の方向での生成 X 線の強度はターゲットの種類と厚さで異なるが，W では厚さ 0.13mm のとき最大となる。¹²⁾ Fe では 0.7mm で最大で 5mm になると最大値の半分となる。上の計算結果では ϵ の値は Fe が W の $1/3$ 以下である。厚さ 5mil (約 0.13mm) の W のターゲットを使用した時のこれから 62 cm の距離における X 線量の角度分布を Fig. 4.1 に示す。これは Field Emission 社が測定したものである。

Hardwick と Guenter によれば，¹³⁾ 2 ~ 3.2 MeV の電子線に対して W および Au のターゲットを使用して 1m の位置での X 線強度を測定して次の関係を得ている。

$$I_w = 3.91 E^{2.98} \text{ R/min.per mA at 1m}$$

$$I_{Au} = 3.75 E^{2.98} \text{ R/min.per mA at 1m}$$

$E = 0.6\text{MeV}$ ，電流を 10^4 A ，パルス巾を 10n sec とすると $I_w = 14.2\text{mR/pulse at 1m}$ となる。Fig. 4.1 では電子流軸上 1 m で約 34mR/pulse となる。先に述べたように Fe の ϵ は W の $1/3$ 以下であり，反応容器に 5mm 以上の厚さのステンレスを使用すれば，電子流軸上 1 m で精々 5.6mR/pulse となる。

次に，電子管の窓から 15 cm のところに厚さ 0.5mm 直径 24 cm のステンレスのターゲットを置き，電子管 5510 (Charging voltage 30 KV DC) からパルス電子線を 20 発発射して実験室内的空間線量分布を測定した。Fig. 4.2 はその結果を mR/pulse で示したものである。この測定には原研でフィルムパッチに使用している Mg_2SiO_4 (Tb) をガラスカプセル内に密封した熱ルミネッセンス線量計を用い，各位置で床面より約 95 cm のところに 1 ケ所に 2 箇づつ組で吊るした。線量は原研で日常使用している KYOKKO 1200 型 READER (720V, 升温 270°C) で測定した。誤差は ± 0.03 である。図中で斜でかこんである値は 3 ヶ月間この線量計を放置し，その間に実験のために発射したパルス数で割った値である。

コバルトガラスの内部に線量分布が形成されるために、 2×10^5 rad 以上の非直線的応答の領域では、たとえ線量率依存性がなくても、コバルト 60-γ 線用の線量較正曲線を使用することができない。PMMA 線量計では測定不可能な低強度領域の測定にはコバルトガラス線量計は有効であろう。

4 制動放射 X 線の空間分布

発射されたパルス電子線の挙動は 3 で述べた通りであるが、この電子線がターゲットにあたつて発生する制動放射 X 線について検討する。電子線（エネルギー E_0 ）を十分吸収する厚さ（600KeV の電子線の飛程は約 200mg/cm^2 ）をもつた物質（原子番号 Z）を通過するときの制動放射 X 線（エネルギー E_{rad} ）の制動放射率 ϵ は次の式で与えられる。

$$\epsilon = \frac{E_{\text{rad}}}{E_0} = \frac{1.98 \times 10^{-4} (1.96 E_0 + 2) Z}{1 + 0.35 \log_{10} (82/Z)}$$

従って 600KeV の電子線に対する ϵ は次のようになる。

ターゲット物質	Pb	Au	W	Cu	Fe	Ti	Al
原子番号	82	79	74	29	26	22	13
$\epsilon (10^{-2})$	5.5	4.94	4.57	1.57	1.39	1.16	0.64

電子線の方向での生成 X 線の強度はターゲットの種類と厚さで異なるが、W では厚さ 0.13mm のとき最大となる。¹²⁾ Fe では 0.7mm で最大で 5mm になると最大値の半分となる。上の計算結果では ϵ の値は Fe が W の $1/3$ 以下である。厚さ 5mil (約 0.13mm) の W のターゲットを使用した時のこれから 6.2 cm の距離における X 線量の角度分布を Fig. 4.1 に示す。これは Field Emission 社が測定したものである。

Hardwick と Guenter によれば、¹³⁾ 2 ~ 3.2 MeV の電子線に対して W および Au のターゲットを使用して 1m の位置での X 線強度を測定して次の関係を得ている。

$$I_W = 39.1 E^{2.98} \text{ R/min.per mA at } 1\text{m}$$

$$I_{Au} = 37.5 E^{2.98} \text{ R/min.per mA at } 1\text{m}$$

$E = 0.6\text{MeV}$ 、電流を 10^4 A 、パルス巾を 10n sec とすると $I_W = 14.2\text{mR/pulse at } 1\text{m}$ となる。Fig. 4.1 では電子流軸上 1 m で約 34mR/pulse となる。先に述べたように Fe の ϵ は W の $1/3$ 以下であり、反応容器に 5mm 以上の厚さのステンレスを使用すれば、電子流軸上 1 m で精々 5.6mR/pulse となる。

次に、電子管の窓から 15 cm のところに厚さ 0.5 mm 直径 24 cm のステンレスのターゲットを置き、電子管 5510 (Charging voltage 30 KV DC) からパルス電子線を 20 発発射して実験室内的空間線量分布を測定した。Fig. 4.2 はその結果を mR/pulse で示したものである。この測定には原研でフィルムバッヂに使用している Mg_2SiO_4 (Tb) をガラスカプセル内に密封した熱ルミネッセンス線量計を用い、各位置で床面より約 95 cm のところに 1 ケ所に 2 箇づつ組で吊るした。線量は原研で日常使用している KYOKKO 1200 型 READER (720V, 昇温 270°C) で測定した。誤差は ± 0.03 である。図中で糞でかこんである値は 3 ヶ月間この線量計を放置し、その間に実験のために発射したパルス数で割った値である。

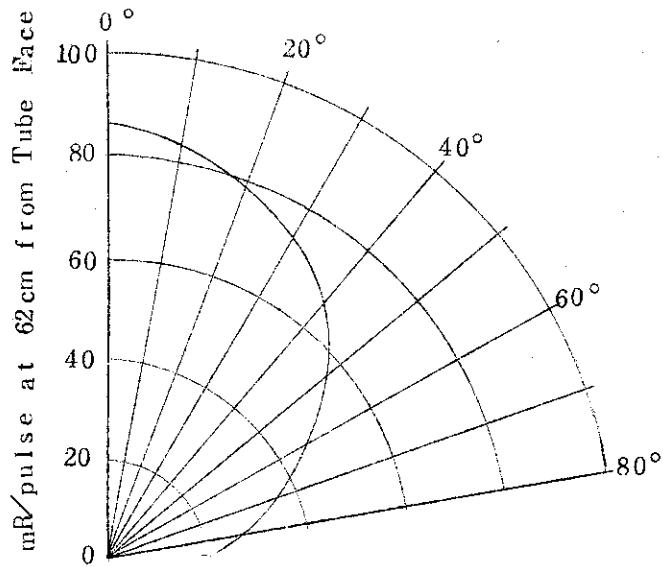


Fig. 4.1 X-ray beam profile (W 5 mil target)

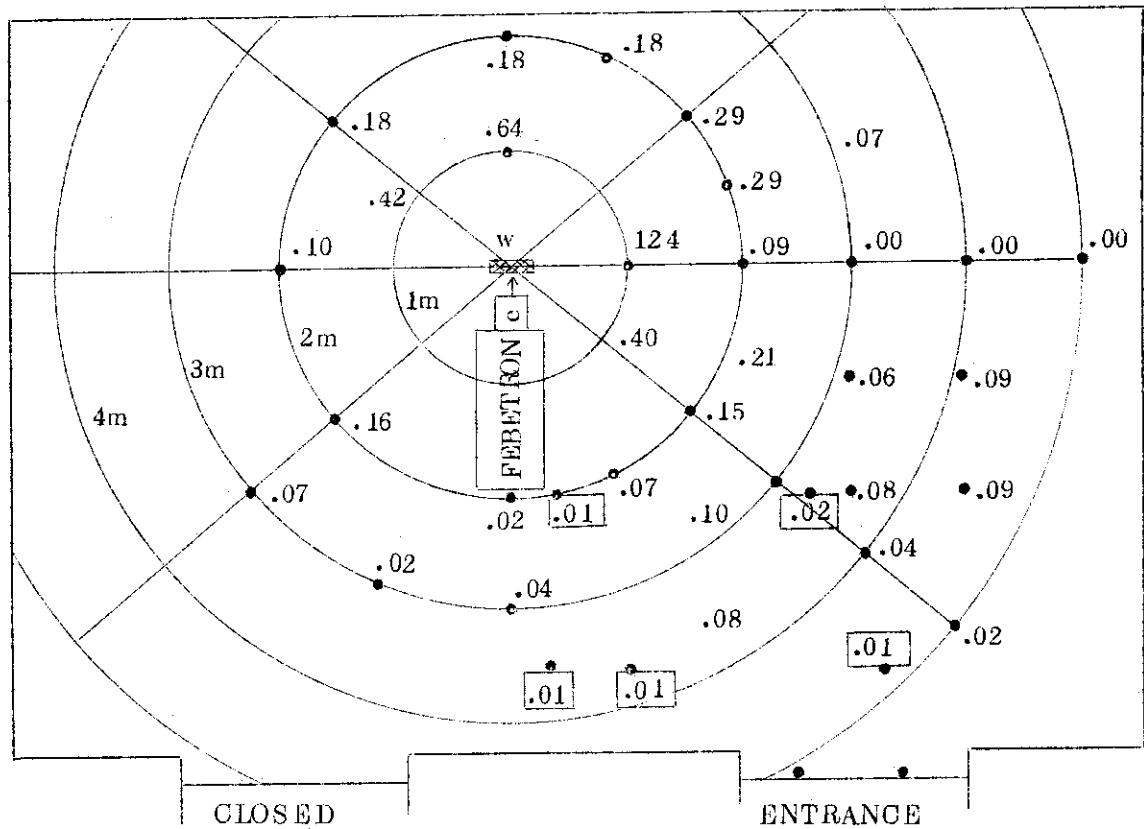


Fig. 4.2 Dose distribution in the laboratory (mR/pulse).

5. References

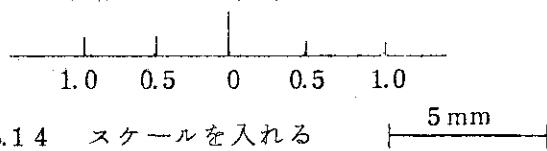
- 1) Herzberg G. : Quart. Rev. 25 201 (1971).
- 2) Link W. T. : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-14 777 (1967).
- 3) Berger M. L. : NASA-CR-112838 (1970).
- 4) Ling C. C., Weiss H. and Epp E. R. : Rad. Research 56 307 (1973).
- 5) Henley E. J. and Richman D. : Anal. Chem. 28 1580 (1956).
- 6) Attix F. H. and Roesch W. C. : Radiation Dosimetry I p. 345 (1968), Academic Press.
- 7) Graybill S. E. and Nablo S. N. : Record 8th Symposium on Electron, Ion and Laser Beam Technology 465 (1966).
- 8) Lawson J. D. : J. Electronics and Control 5 146 (1958).
- 9) McLangh W. L. : Manual of Radiation Dosimetry, Marcel Dekker, New York, 377 (1970).
- 10) 大島, 田中:応用物理 36 515 (1967).
- 11) 田中, 三友, 大島 : JAERI-memo (公開) 4121 (1970).
- 12) MacGregor M. H. : Nucleonics Data Sheet 17 104 (1959).
- 13) Hardwick T. J. H. and Guenter W. S. : Intern. J. Appl. Radiation and Isotopes 12 20 (1961).

J A E R I - M 5775 正誤表

6ページ 上から12行目 (C)は 500 torr → (C)は 600 torr になおす

8ページ 上の図は Fig. 3.1 である

16ページ Fig. 3.9 横軸の目盛の数字を下記のように修正する



18ページ Fig. 3.14 スケールを入れる

19ページ Fig. 3.15 矢印を入れる
" Fig. 3.16 矢印を入れる } 下図参照

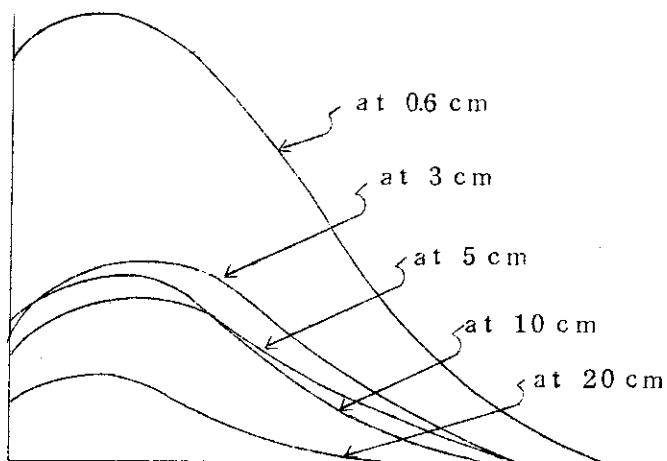


Fig. 3.15

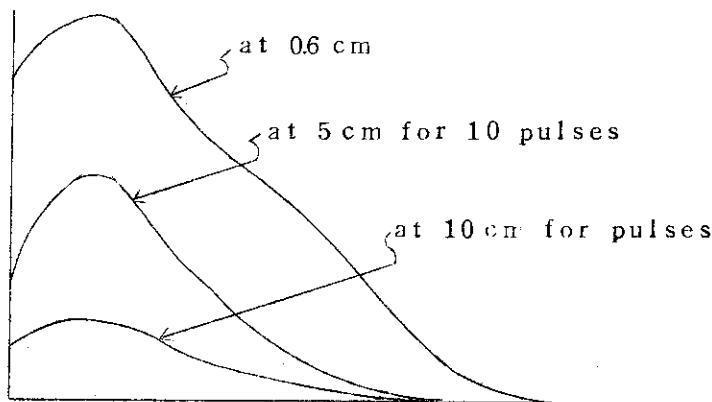


Fig. 3.16