

JAERI 1190

JAERI 1190

高崎研 3 MeV 15 kW 照射用  
電子線加速器

---

1970年7月

---

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

日本原子力研究所は、研究成果、調査結果などを JAERI レポートとして、つきの4種に分けそれぞれの通し番号を付し、不定期に刊行しております。

- |         |                                |             |
|---------|--------------------------------|-------------|
| 1. 研究報告 | まとまった研究の成果あるいはその一部における重要な結果の報告 | JAERI 1001- |
| 2. 調査報告 | 総説・展望・調査の結果などをまとめたもの           | JAERI 4001- |
| 3. 年 報  | 研究・開発その他の活動状況などの報告             | JAERI 5001- |
| 4. 資 料  | 施設の概要や手引きなど                    | JAERI 6001- |

このうち既刊分については「JAERI レポート一覧」にタイトル・要旨をまとめて掲載し、また新刊レポートは「研究成果要旨集」(隔月刊)で逐次紹介しています。

これらのリスト・研究報告書の入手および複写・翻訳などのご要求は、日本原子力研究所技術情報部(茨城県那珂郡東海村)に申しこんでください。

---

Japan Atomic Energy Research Institute publishes the nonperiodical reports with the following classification numbers:

1. JAERI 1001- Research reports
2. JAERI 4001- Survey reports and reviews
3. JAERI 5001- Annual reports
4. JAERI 6001- Manuals etc.

Requests for the above publications, and reproduction and translation should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan

## 高崎研 3 MeV 15 kW 照射用電子線加速器

### 要 旨

1966 年に高崎研究所の 2 号加速器として設置したコッククロフト形電子加速器の 最大定格は加速電圧 3 MV, 加速電流 5 mA であり, また連続定格は加速電圧 2.5 MV, 加速電流 4 mA である。約 3か月の調整運転の後 9 月に所期の性能に達した。

本加速器の電源回路には 20 段の対称インバース形コッククロフト回路とセレン整流器を用い, 動作周波数は 10 kHz である。浮遊容量およびセレン整流器の障壁容量による電圧降下および進相電流を補償するために 5 段ごとに補償コイルを設けた。加速管は 120 段よりなり, 外部からの磁場の影響を除くために  $\mu$  メタル電極を使用している。加速された電子は幅 60 cm に走査されて空気中に取り出されるが, この窓には厚さ 200  $\mu$  のアルミニウムを使用した。

1969 年 11 月

日本原子力研究所高崎研究所

大島裕之助・四本 圭一・田中 隆一  
田島 訓・須永 博美

## 3 MeV 15 kW Electron Beam Generator at Takasaki Research Establishment

### Abstract

In 1966 a Cockcroft-Walton type electron accelerator has been installed in Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment as a second electron accelerator. This accelerator has the maximum output of 3 MV in accelerating voltage and of 5 mA in electron beam current, and continuous rating of 2.5 MV and of 4 mA. After 3 months of adjusting operation, the accelerator was accomplished to the desired capacity.

The cascade generator circuit of the accelerator is of the symmetrical inverse type using selenium rectifiers operating at a frequency of 10 kHz. The voltage drop and the capacitive input impedance of the generator due to stray capacitance are compensated by the compensation coils inserted into the circuit at intervals of 5-stages. The 120-stages accelerating tube is made of overlapped  $\mu$ -metal electrodes for shielding the external field. The accelerated electron beam is scanned in the width of 60 cm, and emitted into the atmosphere from a scanning window which is made of 200  $\mu$ m thick aluminum foil.

Nov. 1969

Yunosuke OSHIMA, Keiichi YOTSUMOTO,  
Ryuichi TANAKA, Satoshi TAJIMA,  
and Hiromi SUNAGA

Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment,  
Japan Atomic Energy Research Institute.

## 目 次

1. まえがき	1
2. 概 要	2
2.1 電源回路	2
2.2 装置の構成	3
2.2.1 直流高電圧発生装置	3
2.2.2 電子銃および加速管	4
2.2.3 電子線走査部	5
2.2.4 制御保護装置	5
3. 建 屋	7
3.1 建屋の概略	7
3.2 照射室の遮蔽	8
4. 据付記録	10
5. 性能および諸特性	14
5.1 電圧効率	14
5.2 加速電圧	15
5.3 電子線電流	15
5.4 制御保護機構	16
5.5 パルス運転	16
5.6 電子線走査	17
6. 線量の測定	18
6.1 概 説	18
6.2 強度分布	18
6.3 深部線量分布	20
6.4 平均吸収線量の算出	23
6.4.1 コンベアー移動照射	23
6.4.2 固定照射	23
7. 工業利用における照射効率	25
7.1 照射効率	25
7.2 処理量	26
7.3 電力的にみた効率	27
8. 結 言	29
文 献	29

## 1. まえがき

高崎研究所において2号加速器の計画が話題になったのは昭和38年である。39年度には債務負担行為として2号加速器の設置が認可された。そしてこの年に本加速器の仕様作成が開始された。

当研究所の1号加速器はアメリカG.E.社製の共振変圧器形加速器で、加速電圧2MVp、最大電子線電流6mA、最大出力10kWである。1号加速器として外国製を購入した理由としては、当時国産で信頼できる照射用加速器がなく、購入してただちに使用できる加速器として実績があるのはG.E.社製の共振変圧器形加速器のみであったからである。

しかし、この加速器の特徴の一つは電子流が直流ではなく、180Hzの周期で幅約1.2msecの時間だけ電子線が加速され、電子はいわばパルス状に放出されることである。このため2号加速器としては直流出力の加速器であることが必要条件とされた。さらに、加速電圧も1号加速器の2MVpでは厚物の照射には不足するので3MVにすることになった。これらの条件を満足する加速器として当時アメリカのRadiation Dynamics社から“ダイナミトロン”という商品名で販売されている加速器が市販では唯一の加速器であった。しかし国産技術の開発も高崎研究所の使命の一つであり、同時に機種の如何によっては国産も可能であるとの判断に立ち、2号加速器は国産のものを購入することに決定した。

当時、高崎研究所長の諮問機関として放射線化学研究委員会線源分科会というのがあり、本分科会の委員には加速器を所有する研究機関の研究者に加えて、加速器を製作している各会社からも代表者が参加していた。そこでこの線源分科会にはかって2号加速器の仕様を検討した。会を重ねること数回の結果、仕様書が作成された。この仕様でとくに留意したことは次のとおりである。

- (1) 加速器の高電圧発生装置をコッククロフトーワルトン形とした。コッククロフトーワルトン形の高電圧発生装置はパンデグラーフ形と異なり原理的に解明しにくい点が少なく、電気回路として計算によってその特性が判断できる。
- (2) 加速器にありがちな仕様ぎりぎりの設計を避けるために最大定格と連続定格とに分け、連続定格を最大定格の約2割引きとした。これによって連続定格に対しては余裕をもった設計が期待できる。
- (3) 放射線化学の発展についてパルス照射もあり得る

と予想してパルス運転も可能なものとした。

以上のこと考慮してまとめた2号加速器の一般仕様は次のとおりである。

1. 形式——縦形ガス封入コッククロフト形
2. 最大定格電子線エネルギー——3 MeV
3. 最大定格電子線電流——5 mA
4. 電子線エネルギー可変範囲——1~3 MeV 連続可変
5. 電子線電流可変範囲  
3~2 MeVについて——0.1~5 mA 連続可変  
2~1 MeVについて——加速電圧の低下とともに最大電子線電流は漸次低下するものとするが、電子線エネルギー 1 MeVについて 0.1~3 mA 以上連続可変とする。
6. 連続定格——本加速器は加速器を停止することなく安定に長期間連続に運転しうることを目標とし、10時間以上の連続運転とする。
  - 6.1 電子線エネルギーおよび可変範囲——1~2.5 MeV 以上連続可変
  - 6.2 電子線電流および可変範囲  
2.5~2 MeVについて——0.1~4 mA 以上連続可変  
2~1 MeVについて——0.1~3 mA 以上連続可変
  - 6.3 電子線エネルギー安定度——電子線電流一定の条件下でリップルを含めて±3%以下であること。
  - 6.4 電子線電流安定度——電子線エネルギー一定の条件下で±5%以下とし、±3%を目標とする。
  - 6.5 電子線エネルギー 2.5~3 MeV、電子線電流 5 mA にて約15分連続運転可能とする。

本加速器は39年9月に製作業者が決定し、その後は少なくとも1か月に1回原研と製作業者との間で設計についての意見の交換を行ない、さらに製作業者で行なつたいろいろの基礎実験の結果についても検討を加えつつ製作を進めた。このようにして41年5月に現場立会検査を完了し、6月に原研に搬入し据付調整が開始された。そして9月に、予定より約6か月遅れて仕様書どおりの性能が確認された。

## 2. 概 要<sup>1)2)</sup>

### 2.1 電源回路

本加速器に用いられた直流高電圧発生装置はよく知られているコッククロフトーワルトン形（以下 C-W 形と略す）のものである。一般にこの形の電源は、負荷電流が大きく段数も多いと電圧降下やリップル電圧が大きくなる。これを改善するために対称回路が考案されているが<sup>3)</sup>、これは Fig. 1 (a) に示すように C-W 形を 2 個重ね合わせたものである。このほかに、対称インバース形と呼ばれる回路<sup>4)</sup>があり、Fig. 1 (b) に示すように、押上げコラムのコンデンサーと最初の整流器を省略した形をとっている。

インバース形、または対称インバース形においては押上げコラムのコンデンサーが 1 個少ないために負荷時の電圧降下が小さい。段数  $n$  が同じでも有効段数が  $1/2$  段少なく、したがって出力電圧が若干低くなることを考慮しても、電圧変動率  $\Delta V/V$  はインバース形にしたほうが有利である。リップル率  $\delta V/V$  はインバース形にすると悪くなるが、段数が 10~20 段にもなるとほとんど差がなくなる。これら各種の C-W 形回路の比較を示したのが TABLE 1 である<sup>5)</sup>。

一般に C-W 形電源回路では、コンデンサーコラム

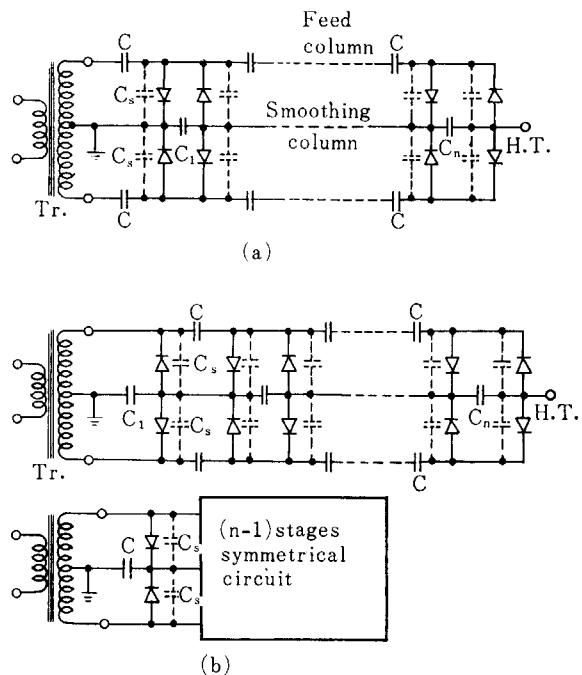


Fig. 1 Cascade generator circuits.  
(a) Symmetrical type ; (b) Symmetrical inverse type.

間に存在する浮遊容量  $C_s$  を通って交流循環電流が流れ、このために電圧降下を生ずる。この電圧降下は、段数が大きいほどまた容量比  $C/C_s$  が小さいほど大きい。

TABLE 1 Comparison of cascade generator circuits.

	C-Wtype	Symmetrical type	Symmetrical inverse type
Output voltage $V_0$	$2nv_0$	$2nv_0$	$(2n-1)v_0$
Voltage drop $\Delta V$	$\{I/(fC)\}(2n^3 + \frac{3}{2}n^2 + \frac{1}{3}n)$	$\{I/(fC)\}(\frac{1}{6}n^3 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{3}n)$	$\{I/(fC)\}((\frac{1}{6}n^3 - \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{3}n)$
Ripple voltage $\delta V$	$\{I/(fC)\}\frac{1}{2}n(n+1)$	$\{I/(fC)\}\frac{1}{2}n$	$\{I/(fC)\}\frac{1}{2}n$
$\delta V/V$	$\{I/(fCv_0)\}(\frac{1}{4}n+1)$	$\{I/(fCv_0)\}\frac{1}{4}$	$\{I/(fCv_0)\}\frac{1}{2}n/(2n-1)$
$\Delta V/V$	$\{I/(fCv_0)\}(\frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{4}n + \frac{1}{6})$	$\{I/(fCv_0)\}(\frac{1}{12}n^2 + \frac{1}{4}n + \frac{1}{6})$	$\{I/(fCv_0)\}(2n^3 - 3n^2 + 4n)/(12(2n-1))$
Voltage efficiency $F$	$(Mb/n)\tanh\{n/(Mb)\}$	$(Mb\sqrt{2}/n)\tanh\{n/(Mb\sqrt{2})\}$	$[1 + (2Mb\sqrt{2})\tanh\{(n-1)/(Mb\sqrt{2})\}]/(2n-1)$
$L_M$	$\{1/(\omega^2 b C_s)\} \coth\{n/(Mb)\}$	$\{\sqrt{2}/(\omega^2 b C_s)\} \coth\{n/(Mb\sqrt{2})\}$	$\{\sqrt{2}/(\omega^2 b C_s)\} \coth\{(n-1)/(Mb\sqrt{2})\}$

$v_0$ : Input voltage (peak value) ;  $n$ : Number of stages (number of smoothing column capacitors) ;  $C$ : Capacitance of column capacitor ;  $f$ : Frequency ;  $I$ : Load current ;  $C_s$ : Stray capacitance per rectifier ;  $b^2 = C/C_s$  ;  $M$ : Number of compensation coils ;  $L_M$ : Inductance of compensation coil at high voltage end,  $L_1 = \dots = L_{M-1} = \frac{1}{2}L_M$ .

これを補償するために複数個の補償コイルを接続したときの電圧効率と必要なコイル数、インダクタンスも TABLE 1 に示されている。TABLE 1 の式からわかるように、電圧効率はコイル数とともに増加する。またインバース形または対称インバース形は押上げコラムのコンデンサーが 1 個少ないために電圧効率がよい。

C-W 形回路は入力端からみて容量性であるが、補償コイルの数とともに入力インピーダンスは増加する。しかし  $C_s = 10 \sim 15 \text{ pF}$  と仮定すると、入力電圧数 10 kV では相当な入力電流となるので、入力端にも高圧端と同じインダクタンスを接続し共振回路とした。ここで対称形の場合の入力インピーダンスは ( $M$  等分の場合)

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{\omega L_M}{j} = \frac{1}{j\omega C_0} \\ C_0 &= \frac{bC_s}{\sqrt{2}} \tanh \frac{n}{\sqrt{2} Mb} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで  $C_0$  は入力端からみた等価静電容量である。対称インバース形では (1) 式の  $C_0$  に  $C_s/2$  が加わる。しかし段数  $n$  が大きいとの違いはわずかであり、共振系とするためには入力端にも TABLE 1 の高圧端と同じ  $L_M$  なるインダクタンスを接続すればよい。

## 2.2 装置の構成

### 2.2.1 直流高電圧発生装置

直流高電圧発生装置は 20 段の対称インバース形の C-W 形回路を使用しており、電源周波数は 10 kHz である。10 kHz の電力は 50 kVA の高周波発電機 (HFG) で発生され、変圧器によって最大 75 kV r.m.s. まで昇圧される。平滑コンデンサーコラムは最下段の  $0.02 \mu\text{F}$  以外は全部  $0.01 \mu\text{F}$  である。Fig. 2 はタンクを取り去った C-W 装置である。平滑コンデンサーコラムに結ばれているフープコラムによって、コンデンサーコラム、加速管、プーリ発電機駆動用ベルトは全部おおわれている。フープコラムは厚さ 16 cm、大きさ  $242 \text{ cm} \times 242 \text{ cm}$  の鉄製のタンクベースの上に組み立てられている。この鉄板には加速管用と C-W 回路の高電圧ケーブル用の貫通孔がある。フープはステンレス製で、フープコラムは組立てに便利なように 4 分轍になって積み重ねられている。フープコラムは組立てた後アクリル棒で全体を締めつけ、地震などにも耐え得るような構造になっている。フープコラムの上部には高圧電極によってシールドされた電装品がのっている。

電装品の電源は 1 kVA, 200 Hz, 100 V のプーリ発電機である。駆動はフープコラム内にある絶縁ベルトを介してタンクベースにある 3 kW の誘導電動機によっ

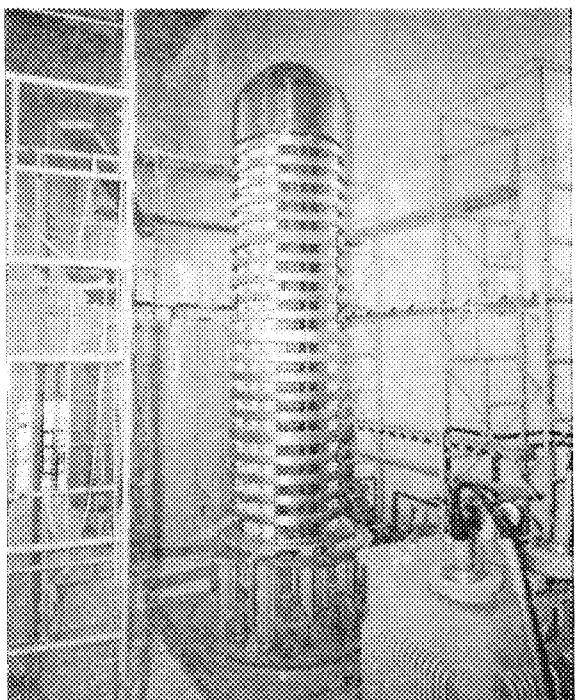


Fig. 2 Photograph of 3 Mev C-W type accelerator. Pressure tank is removed.

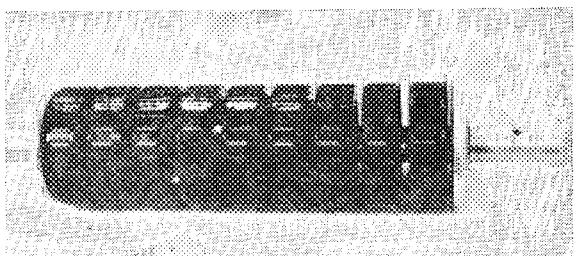


Fig. 3 Selenium rectifier unit

て行なわれる。

セレン整流器は Fig. 3 に示すような構造で、逆耐電圧 190 kVp、平均電流 5 mA のものを使用した。

この高電圧発生装置は、前述のように組立解体を容易にするために、フープコラム、加速管を 4 分轍している。このため 4 本の補償コイル (TABLE 1 の  $M=4$  に相当する) を接続して電圧効率を補償する方式とした。

C-W 組み立て後浮遊容量を測定した結果、一段当たり  $12.5 \text{ pF}$  であり、TABLE 1 の式よりコイルのインダクタンスは最上段が  $8.6 \text{ H}$ 、中段では  $4.3 \text{ H}$  となる。補償コイルは空心で製作し、長さ約 700 mm、外径 95 mm で、ハネカム巻きのコイル素子を直列につないだものである。TABLE 1 の電圧効率の式から補償なし ( $M=1/2$  に相当する) の場合の値は  $F=0.78$  であるが、4 分轍補償によって 0.98 に改善される。さらにこの補償によって C-W 回路の入力インピーダンスが増加し、変圧器よりの進相電流を減らすことができる。

圧力タンクは直径約 2.5 m、高さ約 7 m であり、真空乾燥を行なったのち  $\text{CO}_2$  と 8~9% の  $\text{SF}_6$  の混合

ガスを封入する。絶縁ガスの圧力は定格  $10 \text{ kg/cm}^2$  である。ガスはタンク下部のクーラーによって冷やされ、これがさらにアクリルパイプを通ってセレン整流器、補償コイルあるいは電気品などに吹きつけられるようになっている。本体の縦断面図を Fig. 4 に示す。

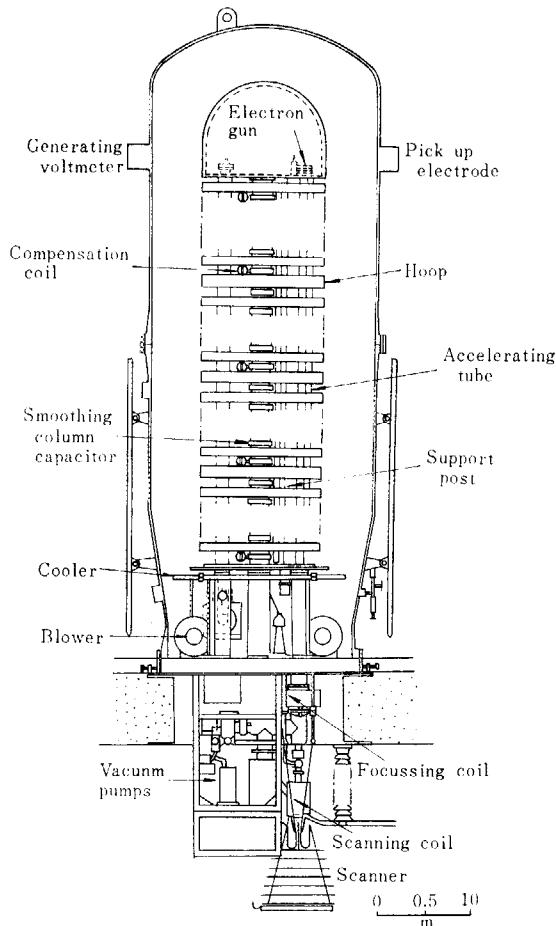


Fig. 4 Cross-sectional drawing of the accelerator

## 2.2.2 電子銃および加速管

電子銃はピアス形のもので、直流ビーム、パルスビームいずれの運転も可能なように 2 つの陽極をもっている。ビーム電流は第 1 陽極の電圧およびフィラメント電流によって制御される。この電子銃を用いて  $10 \text{ mA}$  以上の電子線電流が得られる。第 2 陽極から加速管へはいるときの電子線の集束半角を  $5^\circ$  とすると、第 1 陽極電圧  $2 \text{ kV}$ 、第 2 陽極電圧  $6\sim8 \text{ kV}$  でパービアンスは  $3.7\times10^{-8}$  となる。パルス運転の際には、第 1 陽極に出力管 4B13 で発生したパルス電圧を印加する。電子銃用の電源やパルス回路は高電圧電極内におさめられており、これらの電力供給源として  $200 \text{ Hz}$ 、 $1 \text{ kW}$  の発電機を用いている。

電子銃と加速管の上部の断面図を Fig. 5 に、またその写真を Fig. 6 に示す。加速管は皿形電極とガラス管を

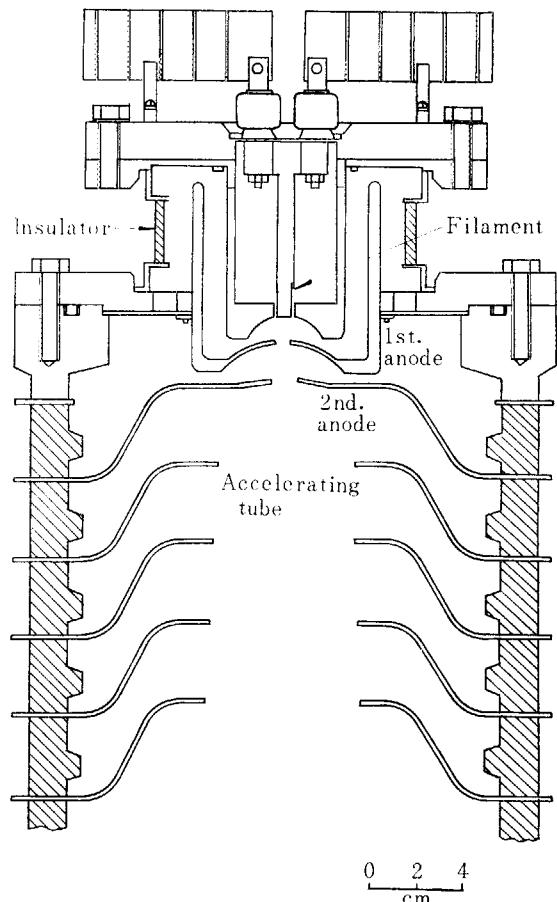


Fig. 5 Electron gun and upper section of the accelerating tube

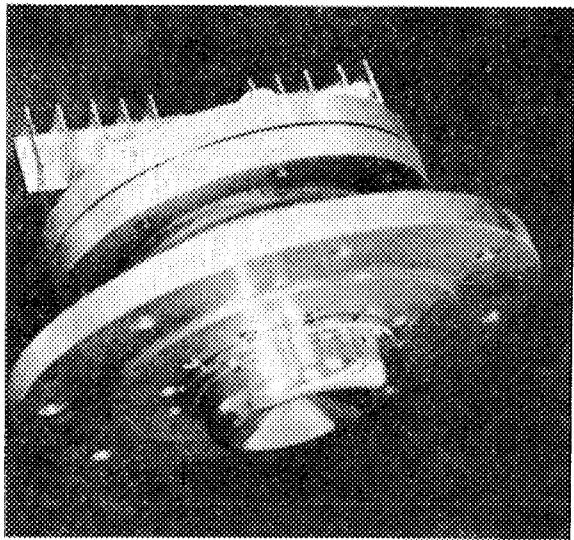


Fig. 6 Photograph of electron gun.

接着したもので全長は  $4.25 \text{ m}$  にもおよぶので、フープコラムの 4 分轍に対応して取り付けに便利なように加速管も 4 分轍されている。加速電極は外部の電磁界のビームに対する影響を防ぐためにミュータルで製作され、さらに電極は互いにオーバーラップする構造を有し、絶縁物の部分を遮蔽する効果を上げている。絶縁用ガラ

ス管は内径 16.4 cm, 外径 23 cm, 長さ 3.17 cm でパイレックス系の硬質ガラスで作られている。加速段数は C-W 回路の段数と 6 対 1 の対応をなしているので、加速電極の電位は分圧抵抗によって決められる。分圧抵抗を流れる電流は加速電圧 3 MV のとき約 1 mA である。

加速管全長は約 4 m であり、加速電圧 3 MV においても 1 段当たりの分担電圧は 25 kV を越えないように設計してある。加速管の電子線通路は、電子線の軌道に関する計算およびローディングなどの現象や排気速度を考慮して決められ、上部より  $1/4$  の付近が最小径 50 mm まで、それを中心として上下にいくにしたがって口径が大きくなっている。最上段では  $70 \text{ mm}\phi$ , 最下段では  $90 \text{ mm}\phi$  である。

電子銃、加速管から電子線走査部（スキャナー）までを含めた全体の真空系は、水冷バッフルつき  $6\text{''}\phi$  の油拡散ポンプ、 $4\text{''}\phi$  の油拡散ポンプおよび  $300 l/min$  油回転ポンプの組合せによって排気される。油拡散ポンプには Dow corning 社製の DC 704 シリコンオイルを使用している。加速管内の真空は電子線用配管の途中で測定し、 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ Torr}$  であり、3 MeV 5 mA で運転するときでも  $3 \sim 4 \times 10^{-6} \text{ Torr}$  程度にしか落ちない。

### 2.2.3 電子線走査部

各種試料や材料の電子線照射を行なうために加速された電子線は 200 Hz の三角波交流磁界で走査され、アルミニウム箔を通して空気中に取り出される。これによって窓の温度上昇も防ぐことができる。三角波磁界を発生する走査コイルは変形くら形のものである。中心の磁束密度は最大  $0.009 \text{ weber/m}^2$  で、長さ 300 mm、幅 150 mm の範囲にわたってほぼ一様磁界となっている。この三角波磁界によって 3 MeV の電子線を最大幅 600 mm まで走査する。電子線取り出し窓には厚さ 200  $\mu$  のアルミニウム箔を使用し、電子の透過の際に生ずる熱は水冷空冷の併用によって取り除かれる。この冷却法

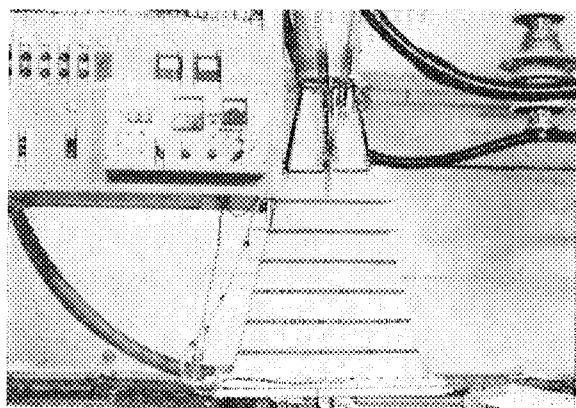


Fig. 7 Photograph of the beam scanner

により電子線電流 5 mA の長時間連転が可能になった。Fig. 7 は電子線走査部の写真である。

### 2.2.4 制御保護装置

加速器を円滑に運転するために各種の制御回路を備えているが、これらは大別して、(1) C-W 回路の制御、(2) 高電圧電極内電子銃用諸電源およびパルス発生回路、(3) 走査電源、(4) 保護装置によって構成される。Fig. 8 は制御系のブロック図を、Fig. 9 は制御機の写真を示す。

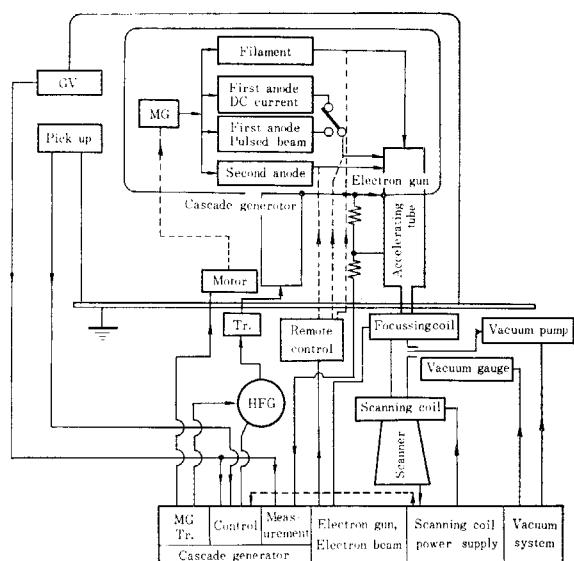


Fig. 8 Operating diagram of the acelerator

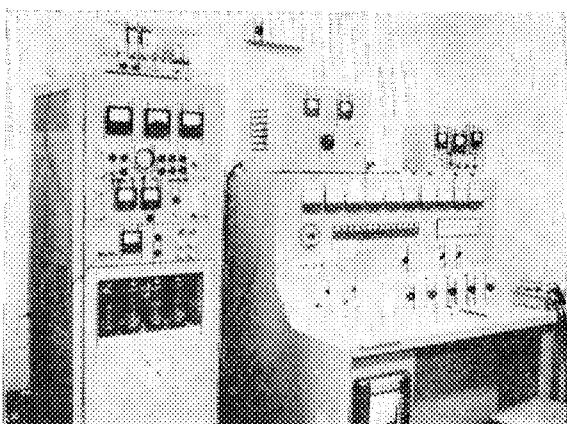
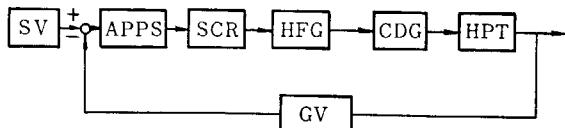


Fig. 9 Photograph of the control console

ている。図からわかるように、加速器の運転に必要な操作および測定はすべて制御機において遠隔操作で行なわれる。

加速電圧は 10 kHz の HFG の励磁を変えて調整され、回転電圧計によって測定される。また加速管分圧抵抗を流れる電流からも加速電圧を知ることができる。回転電圧計の出力の一部は自動パルス位相器 (APPS) に送られ、基準電圧と比較してその差電圧に比例した位相

のゲートパルスでサイリスターを点弧し、HFG の励磁電流を制御する。この加速電圧安定系をブロック図で示すと Fig. 10 のようになる。



SV ; Standard voltage

APPSS ; Automatic pulse phase shifter

SCR ; Silicon controlled rectifier

HFG ; High frequency generator

CDG ; Cascade generator

GV ; Generating voltmeter

HPT ; High potential terminal

Fig. 10 Block diagram of the high voltage regulating system

加速器運転中に電子線を走査しないと電子線取り出し窓が局部的に加熱され、窓の破壊から大きな事故になる。これを防ぐために走査コイルの励磁電源が動作しなければ加速電圧が発生しないようなインターロック回路を備えている。

前にも述べたように、電子線は直流、パルスいずれでも発生できる。このため電子銃第1陽極の直流電源とパルスとは制御機から遠隔操作で切り換えができるように

なっている。パルス運転において電子線電流のパルス幅は  $10 \mu\text{sec}$ ,  $100 \mu\text{sec}$ ,  $1 \text{ msec}$ ,  $10 \text{ msec}$ ,  $100 \text{ msec}$  の5段切り換えであり、それぞれのパルス幅に対応してパルス間隔はパルス幅の2, 10, 50倍の3段切り換えができる、制御機上に表示される。電子線電流はフィラメント電流または第1陽極の電圧で制御され、パルス運転の際には第1陽極に印加されるパルス電圧の波高値が変えられる。これら高電圧電極内の諸回路の制御は直径25 mm のメタアクリル棒によりタンクの下部より操作され、このメタアクリル棒はセルシンモーターにより制御機から操作することができる。

3 MV の電圧では、通常では放電は起こらないが、加速管のフォーメーションの場合など万一放電が起ったときに備え、直径 15 cm の金属板よりなるピックアップ電極を用いた保護回路がある。ピックアップ電極は高電圧電極と対向して圧力タンク内壁に取り付けられた電極で、一種の容量分布器を形成する。絶縁ガス中のコロナ放電や加速管内のマイクロ放電が起こると高電圧電極の電圧が変動し、この電圧変動をピックアップ電極で検出する。このようなサージ信号が検出されると HFG の界磁回路が開放され、加速電圧が下がる。このほか過電圧、過電流、断水などの事故を防止するための保護回路がある。

### 3. 建屋

#### 3.1 建屋の概略

加速器を設置する建屋を設計する場合には次の諸点について考慮する必要がある。

- (1) 加速器本体の搬入口を加速器室に設けること。
- (2) 加速器本体の高圧タンクを取りはずすときのことを考えて建屋の高さおよび面積を選ぶこと。
- (3) 操作室を中心にして、それに接近して照射室、加速器室を設けること。
- (4) 照射室の遮蔽は法規で定められているとおり、遮蔽壁の外側で  $0.2 \text{ mR/hr}$  以下とすること。
- (5) コンベヤー用の迷路も放射線漏洩がないように設計すること。

以上の点を考慮しながら照射施設管理課において、加

速器の寸法図を基礎にして建屋の概略設計を行ない、さらに建設部において本設計がなされた。2号加速器建屋の平面図および断面図を Fig. 11, 12, 13 に示す。

この建屋の特徴は、まず加速器本体の搬入口である。普通は加速器室の側面に搬入口を設けるが、本加速器の高圧タンクが大きいので搬入口が大きくなり、側面に設けたのでは開けたり閉めたりすることが困難である。そこで加速器室を1階の建物よりつき出して、床面に  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  の大きさの開口部を設け、搬入口とした。そして加速器本体の各部品は路上のトラックより、この搬入口を通じてクレーンで持ち込むことができる。

次に建屋、とくに加速器室の天井の高さは高圧タンクを取りはずすときのクレーンの吊りしろを考えて決めなければならないが、天井の高さを低くするためにダブルフックのクレーンを採用した。すなわち、シングルフックでは玉掛け用ワイヤーが高圧タンク内のコラムに当たらないよう十分な吊りしろをとらなければならぬ

が、ダブルフックを使用することにより、この問題を解決することができた。

操作室は、照射室に隣接して配置し、遮蔽窓により照射中に被照射物の監視を行なうことができる。また操作室よりの階段を通じて、直接加速器室にはいることができる。運転中に故障などのあった場合でも操作者はただちに加速器室に行って加速器の状態をみることが可能である。

加速器タンク内に封入する炭酸ガスボンベを貯蔵し、また操作するため、M-G室の外側にボンベ置場があり、炭酸ガスはここから配管を通してタンク内に送られる。操作室、照射室、加速器室、コンベヤー操作位置およびボンベ置場には相互に通話可能なインターホーンがある。

照射室の回りの空間はコンベヤーへの荷の積み下ろしをする作業場と、パイロット装置などを設置するための場所である。装置室は本加速器室を使用して行なわれるトリオキサンの重合のための各種装置を設置する室である。

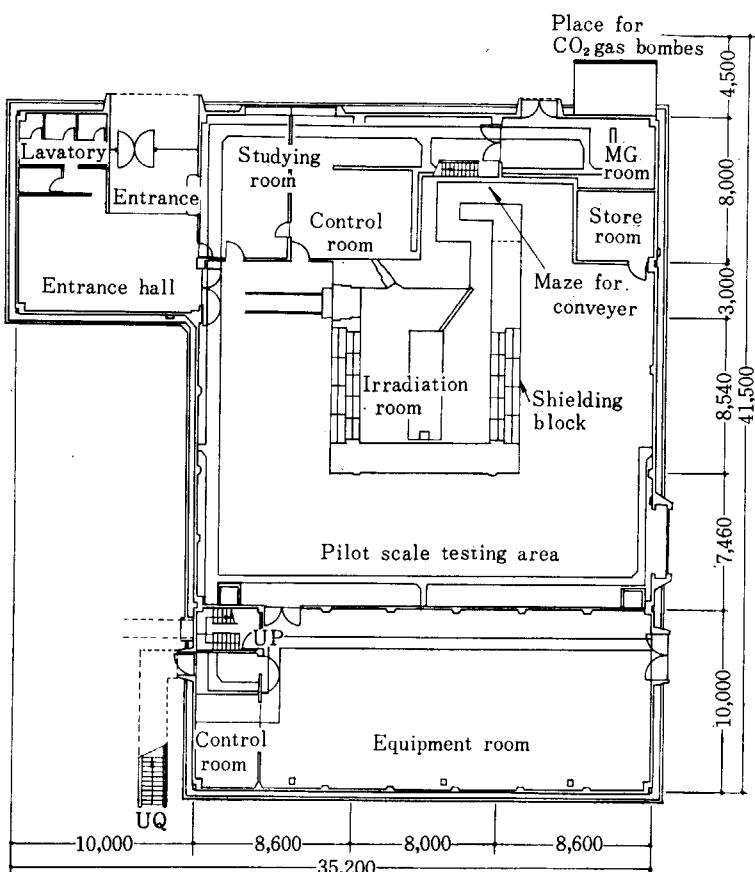


Fig. 11 The plane figure of the accelerator building

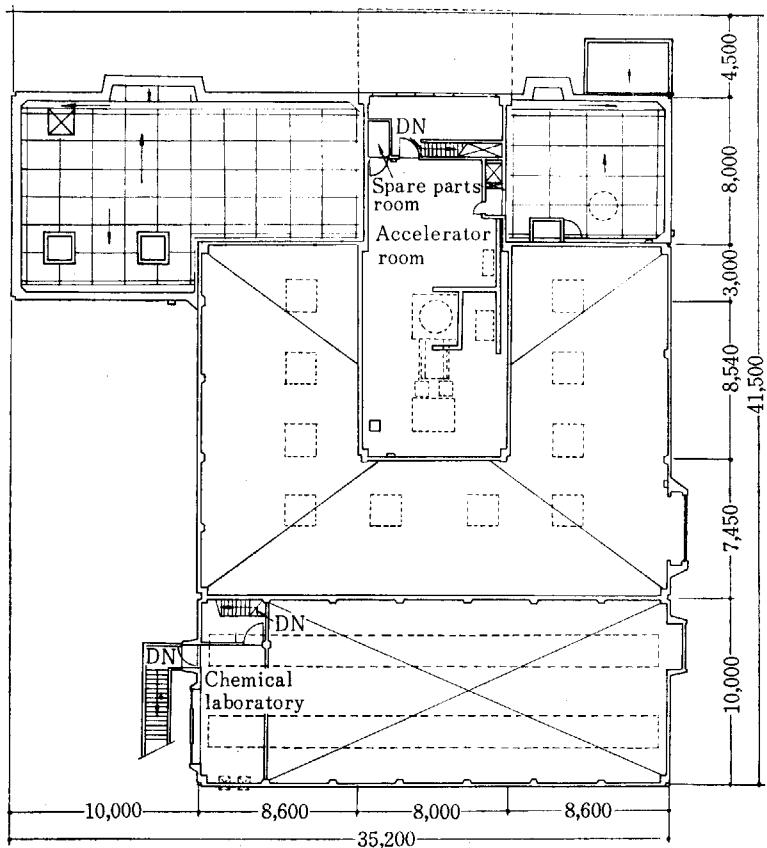


Fig. 12 Plane figure of the accelerator building (2nd floor)

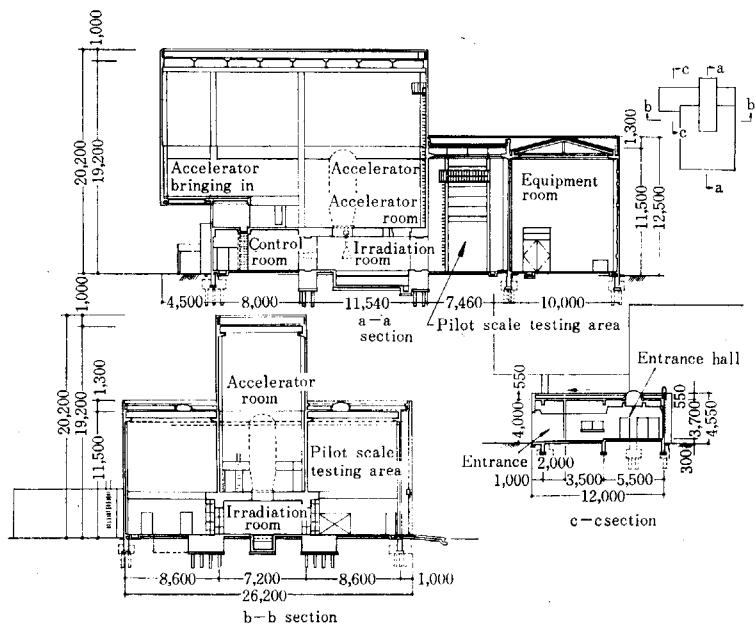


Fig. 13 Cross sectional figure of the accelerator building

### 3.2 照射室の遮蔽

電子線加速器の照射室を設計する際に、遮蔽の点で考

慮しなければならないのは制動放射X線である。本加速器のように電子線の加速エネルギーが3 MeV程度の場合には、電子線の入射エネルギーが制動放射X線のエネルギーに変換される割合、すなわち変換効率はせいぜい数%の程度である。最近では電子線加速器の利用方法として単に電子線源としてではなく、金やタンゲステンのターゲットを取りつけX線源として用いられるような試みも若干ではあるが行なわれるようになってきている<sup>6)7)</sup>。したがって照射室の遮蔽を考える場合には、このようなX線に対して十分な遮蔽を行なう必要がある。

この制動放射X線は連続スペクトルの形をしたエネルギー分布をもち、厚いターゲットを用いた場合には Fig. 14 のようになり、このスペクトル形は入射する電子線の加速エネルギーが1~3 MeVの範囲ではあまり変化しない。X線強度は電子線がターゲットに入射する方向(0°方向)に強くなるような角度分布をもち、電子線の加速エネルギーが大きいほど、0°方向の強度は大きくなる<sup>8)9)10)</sup>。

われわれは3.0 MeV, 5.0 mAの電子線が厚い金ターゲットにスポット状で入射する場合を想定して遮蔽計算を行なった。この場合のX線強度は、電気学会技術報告62号の第58図によると<sup>11)</sup>、0°方向で1100 R/min/mA at 1 mであり、90°方向では105 R/min/mA at 1 mである。実際に計算を行なう場合には次の条件を仮定して行なった。

(1) 0°方向に放射されたX線は床面のコンクリート、ピットなどにより1回ないし2回の散乱をうけるために遮蔽壁の位置では強度が $1/1000$ 以下になると考えられるから、この方向のX線の寄与は無視できる。

(2) 計算を行なうにあたり、X線のエネルギーについてはFig. 14に示したスペクトルの各エネルギー成分について減衰係数(attenuation coefficient), 再生係数を用いて計算することが必要であるが、実際に遮蔽壁の厚さが1 m以上になればスペクトルの高エネルギー端の近傍だけが問題となってくる。また既存の電子線加速器によるいろいろの実測結果から、X線の高エネルギー端が3 MeV

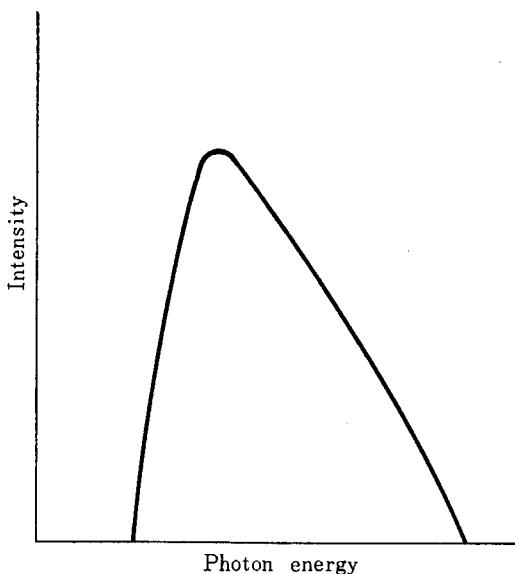


Fig. 14 Typical bremsstrahlung spectrum

ときには平均エネルギーを 2.4 MeV として計算を行なった。

この仮定に基づいて照射室の各遮蔽壁について計算した結果を TABLE 2 に示す。この場合の遮蔽コンクリート（比量 2.8 の重コンクリート）に対する質量減衰係数および再生係数は、(2) の仮定に基づいてそれぞれ  $0.0495 \text{ g/cm}^2$  および 11 として計算したものである。

TABLE 2 Result of the calculation of shieldings

Wall*	Exposure rate
A	$6.78 \times 10^{-3} \text{ mR/hr}$
B	$7.86 \times 10^{-3}$
C	$3.06 \times 10^{-3}$
D	$8.16 \times 10^{-3}$

\* See Fig. 15

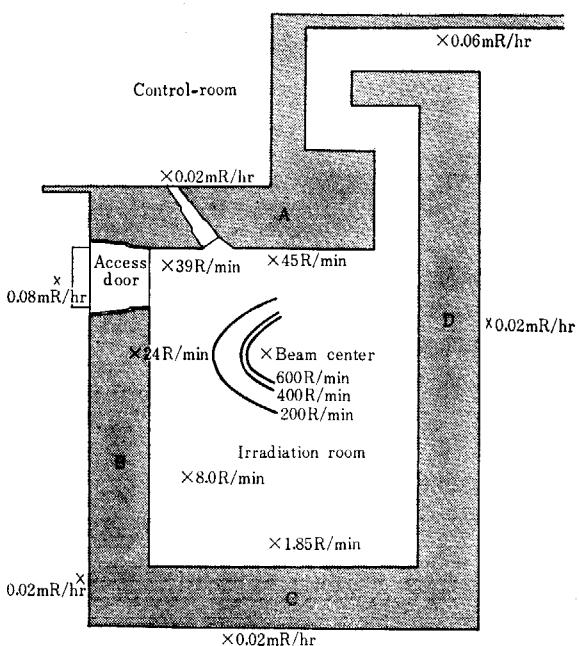


Fig. 15 X-ray intensity in the irradiation room measured by Radocon probe 603. The output of the accelerator was maintained at 2.5 MeV. 1 mA and Au target was attached under the beam window during measurement. And also measured value of the leakage flux at outer side of the irradiation room by Aloka TGS-101C Type G-M Survey meter was plotted.

加速器の照射窓の下に厚さ 0.8 mm の金のターゲットを取り付け、電子線をターゲットの面上で走査させながら X 線を発生させたときの照射室の照射率分布を Fig. 15 に示す。この測定は Victoreen 社製 Radocon 575 A 形線量率計で測定したもので、プローブは 607 を使用した。また照射室外側、遮蔽壁付近の漏洩照射率は GM 式サーベイメーター TGS 101 形を用いて測定し、この結果も Fig. 15 に同時に示した。

## 4. 据付記録

本加速器の高崎研究所への据付けは、昭和41年5月29日から機器の搬入および組立て作業が開始された。高電圧発生装置は、高さ 200 mm、最大外径 250 mm $\phi$  の O.F 形碍子コンデンサー 58 個を 3 本のコンデンサーコラムとして積み上げ、これに 78 本のセレン整流体を Fig. 16 のように配置して対称インバース形 C-W

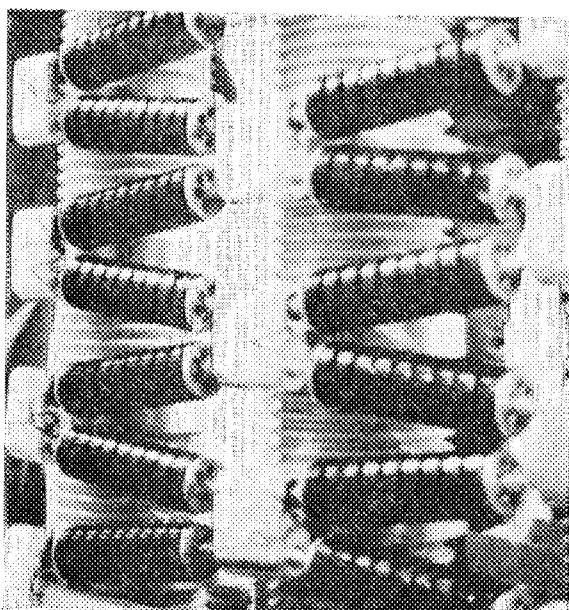


Fig. 16 Photograph of the framework of the condensers and the selenium-rectifiers

回路を形成したものである。そしてこの高電圧発生装置と並行して最大外径 230 mm $\phi$ 、パイレックス製の加速管が配置され、これらの周囲をフープでとり囲んでいる。高電圧発生装置の積み上げ高さは 4250 mm、フープの

外径は 1300 mm $\phi$  で、全体は内径 2400 mm $\phi$ 、肉厚 12 mm の高圧タンクにおさめられている。加速管下部は照射室内にあるスキャナーナーにつながり、それは高さ 1850 mm で、厚さ 200  $\mu$  のアルミニウム箔を照射窓（面積 60 mm × 600 mm）として使用している。加速管の真空装置は、4 インチ、および 6 インチの油拡散ポンプを直列に接続したものを使用した。これもまたスキャナーナーと並行して、照射室の天井から吊り下げられた。高電圧発生装置への電力の供給は、高周波発電機から変圧器を通して行なわれる。高周波発電機は誘導電動機で駆動し、出力 10.4 kHz, 50 kVA のものであり、M-G 室に設置された。高周波変圧器の定格は 1 次測 800 V, 2 次側最大 80 kV × 2 で出力は 50 kVA であるが、これは高圧タンクと並んで加速器室に据付けられた。変圧器の 2 次側出力は、ポリエチレン高電圧ケーブルによって照射室を通り、高圧タンク下部から高電圧発生装置へ供給される。以上のような組立て作業は、一応工場での立会試験を行なってきているため、さしたる問題もなく、順調に進み、約 20 日間で完了した。Fig. 17 に各機器の配置図を示す。

6 月 25 日からは調整運転をはじめたが、この段階で問題となった点は、次の諸点である。

- (1) 変圧器 2 次側と C-W 回路とのマッチング。
- (2) 走査コイルに流す電流の波形と照射窓面での電子線電流の分布状態。
- (3) 照射窓の冷却。

(1) は C-W 回路の L や C によって供給電流の位相がずれてしまい電力損失が大きくなるという問題であるが、これについては結局、変圧器 2 次側の高電圧ケーブ

ルとアースとの間に碍子形コンデンサーを入れることによってマッチングをとり解決した。

(2) については、本加速器の電子線の走査は 200 Hz の三角波で行なうよう設計されたのであるが、実際にこの三角波で電子線の走査を行ない、照射窓直下での電子線電流分布を移動形ファラデーカップで測定すると Fig. 18 のようになり、両端は中央の平坦な部分に対して極端に高くなる。このような分布状態は、電子線照射に利用する場合好ましくないし、また照射窓の局部的な温度上昇の原因となり劣化を早める。これは三角波の頂点がまるくなっているた

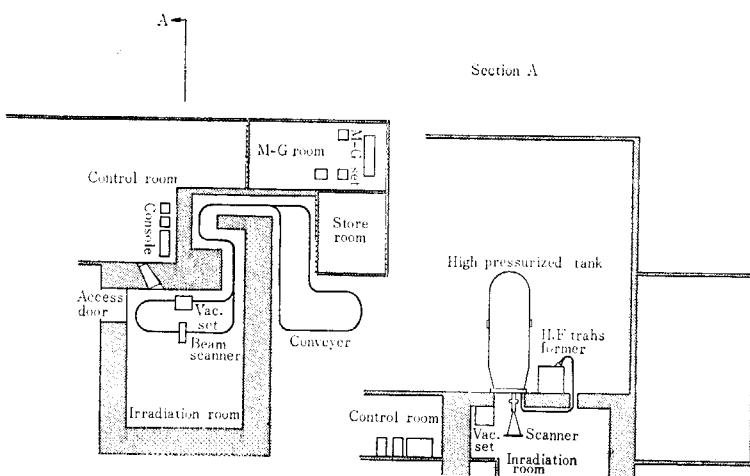


Fig. 17 Schematic layout of the accelerator installation

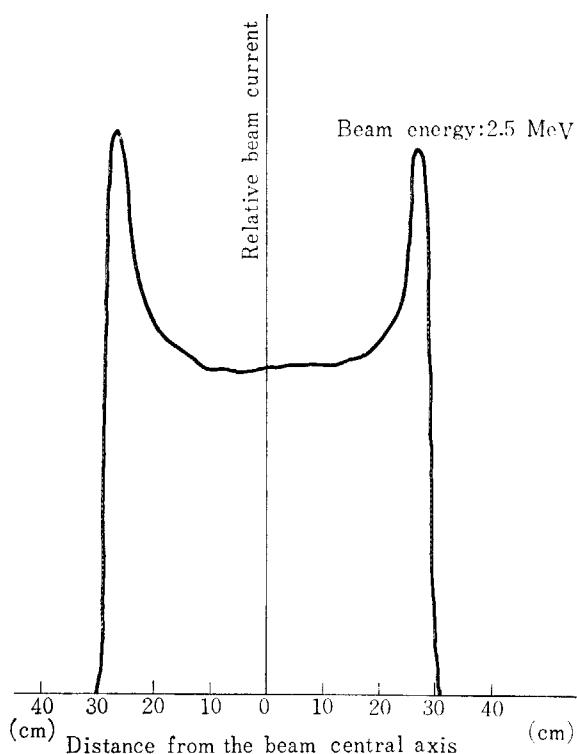


Fig. 18 Chart trace of relative beam current obtained by probe type Faraday cup which was moved through the beam area at a constant rate

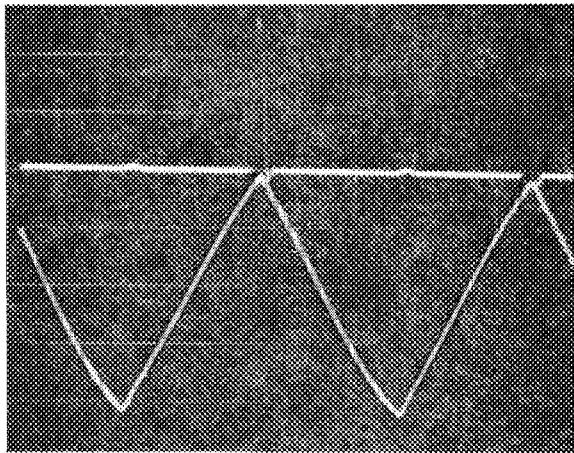


Fig. 19 The wave form of the scanning current and Synchronized kick pulses.

めと考えられるので、これを改善するため、走査コイルの下にさらにキックパルスコイルを取り付け、走査コイルに流す三角波の頂点すなわち電子線が両端に走査されたときにパルス的に電子線をとばすようにした (Fig. 19)。この結果分布状態は Fig. 20 に示すようになり両端が高くなる傾向はかなり緩和された。

(3) の問題については、当初照射窓の冷却は水冷のみで行なうように設計されていたが、 $200\mu$  のアルミニウム箔を窓に使用した場合、2 MeV, 2 mA で 2 時間位連続運転をするとアルミニウム窓の温度が上昇し、アルミ

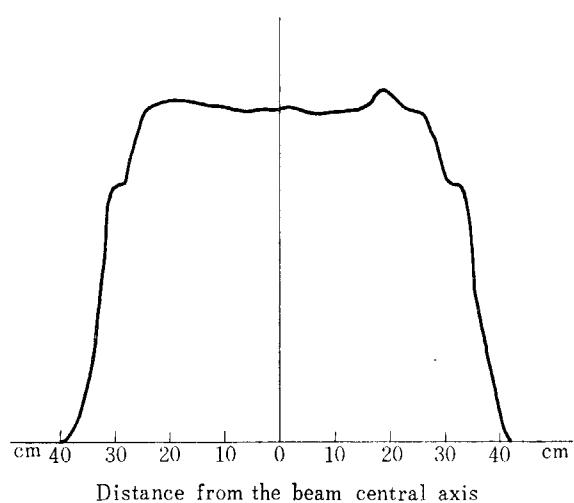


Fig. 20 Relative beam current distribution along the long axis with using the kick pulse system

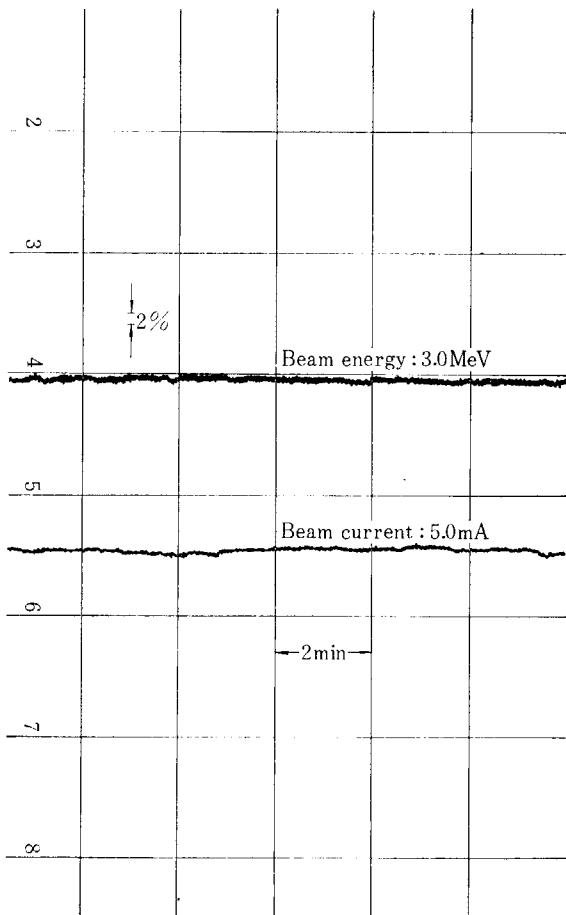


Fig. 21 The stability of the beam energy and the beam current at maximum rating operation.

ニウムの箔面に縞模様が観測されたため、スキャナーワーク端部に空気放出口を取り付け、水冷、空冷を併用することとした。

このようないくつかの問題点をそのつど解決したのち

9月20日からはいよいよ最終調整にはいり、出力を除々に上昇した結果、9月28日には最大定格3 MV, 5 mA の出力で20分の連続運転に成功した。この最大定格出力時の運転状況は Fig. 21 に示す。ここで加速電圧は回転電圧計からの電流を記録したものであり、電子線電流は、C-W 回路の負荷電流から分圧抵抗に流れる電流を回路的に差し引いた電流を記録したものである。安定度はいずれも±2%以内で、照射用加速器としては、十分満足できるものであった。

10月から照射のための運転が開始され、トリオキサンの重合、その他の照射に利用され順調に稼動したが、約1年後、昭和42年10月に第1回目のオーバーホールを実施した。この1年間の照射利用時間の合計は238時間であり、この間真空系統、制御系統などに若干のトラブルがあったほかは、外部から検出されるような故障はなかった。しかし高圧タンクを解体し、内部の総合点検を行なったところ、高電圧発生装置に次のような欠陥が発見された。

- (1) セレン整流体の破損 11本
- (2) コンデンサーの油洩れ 2個
- (3) リアクトルの破損 4リング

このうえ、上部電極内の集束用電源部のコンデンサーに油洩れしているものが1個あり、また実際には使用できるのであるが、上部電極内の制御に用いているアクリル樹脂の制御棒の表面にヘヤークラックとでも呼ばれるような細いすじがみられた。

セレン整流体は、Fig. 22 に示すようなリングを9つ直列につないだものを単体として用いているが、破損の

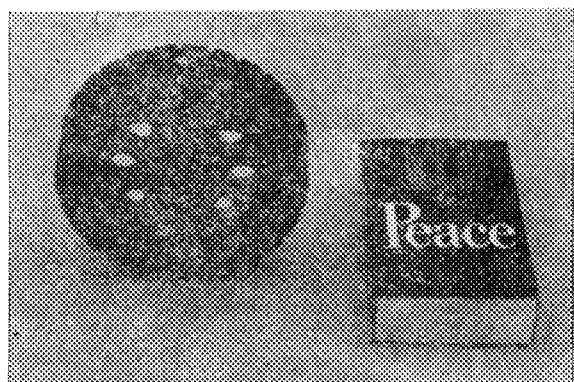


Fig. 22 The photo of selenium rectifier ring (nine rings in series constitute one rectifier unit in Fig. 3)

原因はリングからリングへの放電、あるいはリング中のブロック間での放電によるものと判断され、その対策としてはリングとリングの間に厚さ 1 mm の雲母板の隔壁をはさみこむ方法が用いられた。リアクトルの焼損は、セレン整流体が破損した際の過電流によるものと考えられるので、これについてはとくに対策は講ぜず、そのまま焼損した部分を交換し使用することとした。コン

デンサーの油洩れは、高圧タンク内での呼吸作用または温度上昇などによって碍子と取付金具のすきまから油がにじみ出すものであるが、これも新品と交換するだけにとどめた。

加速管ではガラスの部分がだいたい一様にうっすらと着色していたが、電極その他を外観によりチェックしたところ、放電の痕跡もなく、また電子銃の部分では引出し電極、集束電極の部分にかなりのスパッタリングのあとがみられるほかは、フィラメントの“ほそり”もあまりなく正常であった。約2か月かかってこれらの点を補修し調整を行なった結果、装置の性能は引き渡しを受けたときの状態に復元し、加速電圧・電子線電流の安定度も十分満足できるものとなった。

昭和44年6月30日現在、本加速器の運転実績は合計で約800時間であるが、この間トリオキサンその他の高分子物質の照射や放射線物理工学の実験などと並行して、工業用加速器としての特性を明らかにするために定格出力における連続運転試験などを行なってきた。

本加速器の通常定格出力 2.5 MV, 4.0 mA, 10 kW での連続運転は現在のところ5時間までしか行なっていないが、この間の出力の安定度は、加速電圧について ±2.5% 以内、電子線電流については ±2% 以内であった。加速電圧は高圧タンクに取り付けられた回転電圧計で測定し、この電流の一部を磁気増幅器と SCR 回路を組み合わせた制御回路を通して高周波発電機の界磁電流に饋還し、自動調整されるようになっている。したがって、この自動電圧調整回路の動作特性が加速電圧の安定度を決定する主要素となるわけである。この回路は操作室の制御盤に組み込まれているが、温度の影響を多分にうけ実際に正確な測定は不可能ではあるが、周囲の

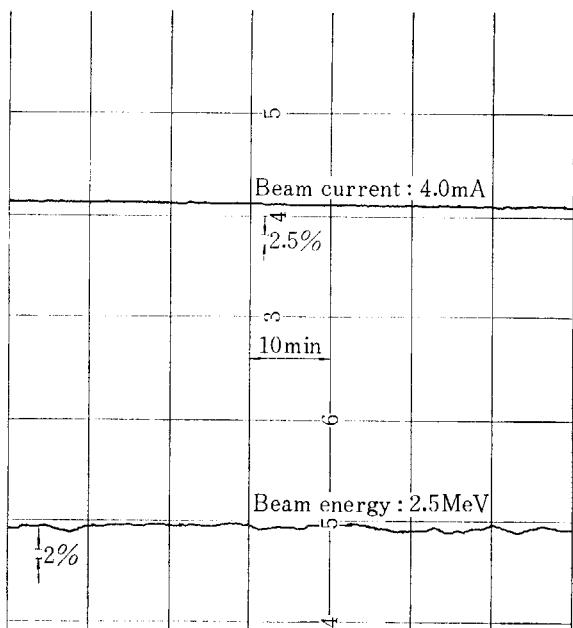


Fig. 23 The stability of the out put at 2.5 MeV, 4 mA operation for 5 hours running

温度が上昇すると制御動作がわるくなり加速電圧の安定度が低下する傾向にある。われわれは、この温度上昇を抑えるためにファンでこの回路を冷却しているが、連続運転をした場合この回路部の表面での温度上昇は、5時

間の運転に対して  $5^{\circ}\text{C}$  程度であり、この範囲では加速電圧の安定度に変化はみられなかった。このときの加速電圧、電子線電流の記録の一部を Fig. 23 に示す。

## 5. 性能および諸特性

### 5.1 電圧効率

本装置は電圧効率改善のために複数補償コイル法が採用されているので、まずこの補償効果を調べた。各段の押上げコラム間の交流電圧は補償なしでは Fig. 24 のように最上段（高電圧端）では入力電圧  $v_0$  の約 70% に低

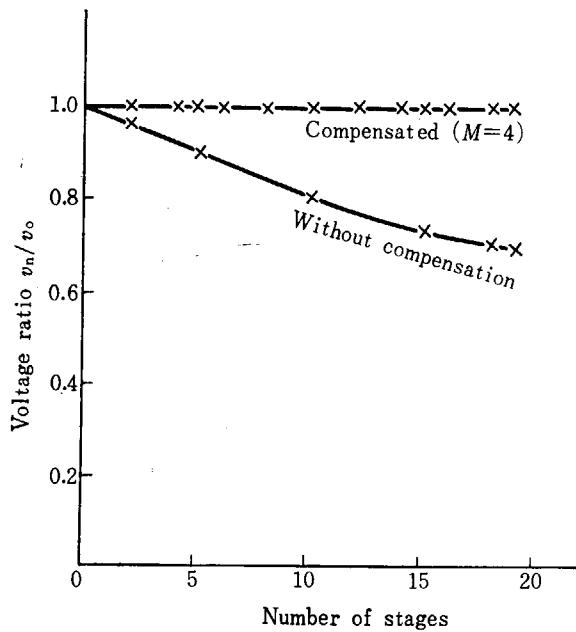


Fig. 24 Voltage ratios of each stage to input voltage  $v_n/v_0$

下し、このときの電圧効率は 80% である。しかし 4 分轉の補償を行なうと各段の電圧分布は Fig. 24 のようにほぼ一様となって入力電圧と等しくなり、電圧効率はほぼ 100% となる。さらにこれを確認するために、大気圧中で電圧を発生し各段の直流電圧がどのようにになっているかを調べた。その結果は Fig. 25 のように出力電圧は段数とともに直線的に上昇し、補償が有効に行なわれていることを示している。

これまで述べた補償は装置の運転周波数で最適条件を満たすようにきめられている。したがって周波数の変動があれば電圧効率も変化することになる。いま運転周波数を  $\omega_0$ 、このときの電圧効率を  $F_0$ 、周波数  $\omega$  での電圧効率を  $F$  とし、補償コイルを  $M$ 、 $\mu = \omega/\omega_0$  とする

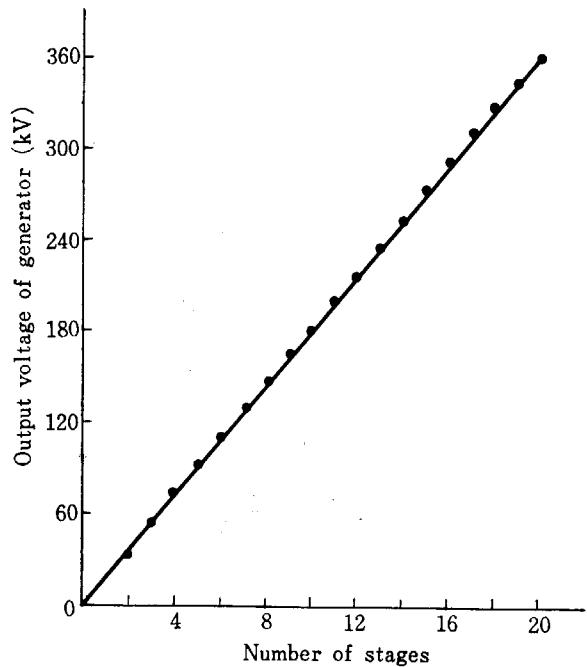


Fig. 25 D.C output voltage of the generator at each stage

$$\left. \begin{aligned} \frac{F}{F_0} &= \frac{\tan M\beta}{2M \tan \frac{\beta}{2}}, & \mu \leq 1 \\ &= \frac{\tan M\alpha}{2M \tanh \frac{\alpha}{2}} & \mu > 1 \end{aligned} \right\}$$

となり、 $\mu$  と  $\alpha$ 、 $\beta$  との関係は

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta &= \cosh m_T - \frac{\cosh m_T - 1}{\mu^2}, & \mu \leq 1 \\ \cosh \alpha &= \cosh m_T - \frac{\cosh m_T - 1}{\mu^2}, & \mu > 1 \end{aligned} \right\}$$

$$m_T = \sqrt{2} n/Mb$$

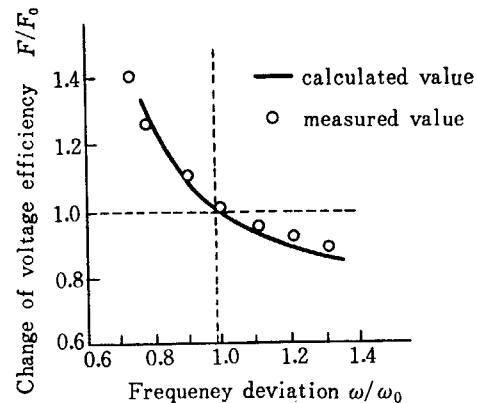


Fig. 26 Change of voltage efficiency as deviation of frequency

となる。本装置では  $M=4$  であるので、他の数値も入れて上式から電圧効率の変化を計算すると Fig. 26 のようになる。同図で○印は実測値であるが実線で示した計算値とよく一致している。これからわかるように、周波数変動 2 % を考えると、低周波側へ動くと電圧変化 + 2 %、高周波側へ動くと電圧変化 - 1 % となり著しい変化はおこらない。とくに本装置のように HFG を電源としているときには、この変動は HFG の特性からある程度自動的に補償されていると考えてよい。

## 5.2 加速電圧

C-W 形の直流電源はバンデグラーフ形などに比べて静電容量が著しく大きく、ラジアルスパークをとばして発生電圧の限度を見ることは部品の破損などを招くので危険である。この点を考え本装置の試験ではできるだけラジアルスパークをとばさないようにした。電圧を上げるときには通常加速管の微小放電あるいはローディングなどが問題になるが、本装置ではこの点について重大な欠陥はみられなかった。ローディング現象は 1 週間程度のフォーメーションで問題にならない程度に減少した。

加速電圧は HFG の出力を変えて調整されるが、この関係の一例を Fig. 27 に示した。これは負荷電流が加

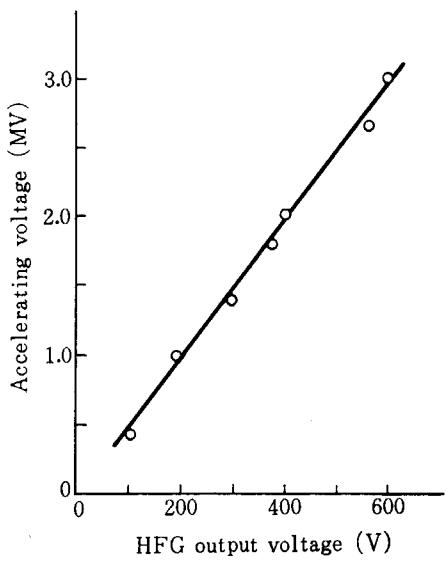


Fig. 27 Relation between accelerating voltage and HFG output voltage  
(load is only voltage dividing resistors)

速管の分圧抵抗を流れる電流だけの場合である。電子線を加速して負荷電流を増したときの電圧変化は Fig. 28 のようになり、電圧変動率は 75 kV/mA である。この電圧変動の大部分はセレン整流器と変圧器のインピーダ

ンスによる電圧降下に起因するものである。脈動電圧は 3 MV, 6 mA (電子流 5 mA + 分圧抵抗を流れる電流) の場合で約 700 V である。

加速電圧は回転電圧計を用いて測定しているが、その較正は一般にむずかしく、いろいろの方法が考えられている。たとえば陽子加速の場合には Li(p, n)Be 反応の

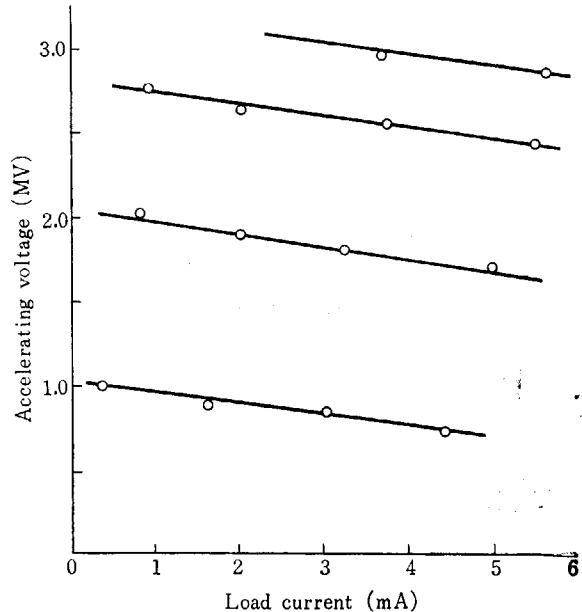


Fig. 28 Accelerating voltage vs. load current

しきい値 (1.882 MeV) を利用して較正できるし、また電子加速では Be をターゲットに用いた場合の制動放射のしきい値 (1.662 MeV) を利用して較正できる。しかし本加速器のように照射用のものでは照射の実体に合わせて加速電圧を較正しておくほうが便利であると考えた。そこで本加速器の加速電圧の較正はメタアクリル樹脂を照射して生ずるリヒテンベルグ放電図形から観測された透過深さをもとにして行なった。こうして決定された加速電圧は次章で説明するポリエチレンテレフタレートフィルムを用いて測定した深部線量分布曲線から求められる透過深さから推定される電子線エネルギーにだいたい一致することが確かめられた。

## 5.3 電子線電流

電子線の走査は照射用加速器の重要なポイントであり、照射むらを生じないために一様な走査が望まれる。さらに不均一な走査ではスキャナのアルミニウム窓の過熱破壊がおこる。次章に詳しく述べるように走査された電子線電流の分布は 60 cm の幅にわたって均一であることが確認された。

電子線はピアス形電子銃の第 1 陽極および第 2 陽極で

集束されるが、電流が大きいために加速管通過後の集束はあまりよくない。アルミニウム窓の位置で塩化ビニールの着色から測定した結果では電子線の直径は約18mmである。

電子線電流の測定は C-W 回路の 2 次側の直流負荷電流から分圧抵抗に流れる電流を差し引いたものが気中ビームとして測定できるようにメーターが接続されている。アルミニウム窓から放出される電子線電流は気中ビームからさらに窓電流を差し引いたものになる。

前章で述べたように長時間運転の場合の加速電圧および電子線電流の安定度はよく、照射用加速器として満足すべきものである。

#### 5.4 制御保護機構

本加速器は工業用加速器としての使用に耐え得るよういろいろの制御保護機構を備えている。

まず加速管の真空排気系は昼夜運転を行なうため無人でも停電、断水、真空度低下の場合にポンプ類が保護されるようになっている。すなわち 6" 油拡散ポンプと加速管との間にあるゲートバルブは圧縮空気作動バルブであり、また油拡散ポンプと油回転ポンプの間は電磁バルブを使用している。停電の場合にはすべてのポンプの動作がとまるが、同時にこれらのバルブが自動的に閉じ、油回転ポンプには空気がはいる。停電の場合は後刻通電された場合でも真空排気系は自動復帰しない。断水の場合には油拡散ポンプの冷却用配管の水路にある断水リレーで検出し、停電の場合と同じような動作を行なう。無人の時にアルミニウム窓が破損する場合などの真空度低下は真空計で検出し停電の場合と同じような動作を行なうようになっており、この場合の検出には電離真空計のイオン電流を測定するメーターのメーターリレーを用い、通常は  $2 \times 10^{-5}$  Torr にセットしてある。

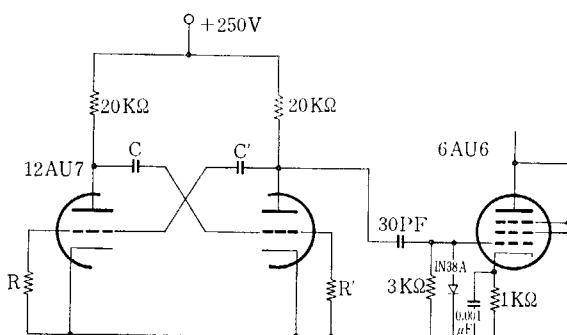
高電圧に対する制御保護機構としては、放電について第 2 章で述べたピックアップ電極があり、さらに過電圧に対しては回転電圧計のメーターにあるメーターリレーを用い、通常は 3.2 MV 程度で高電圧発生装置の回路が切れるようになっている。

高周波発電機は水冷であるが、これには断水リレーと過電流リレーが設けてある。

これらの制御保護装置は時に応じて作動し、不測の事態の場合の加速器の保護に役だっている。

#### 5.5 パルス運転

第 2 章で述べたように本加速器はパルス運転も可能である。この場合には第 1 陽極にパルス電圧を印加する。パルス発生回路は Fig. 29 に示すように RC 回路で時



The circuit of the pulse generator

Fig. 29 The circuit of the pulse generator

TABLE 3 Performance of pulsed beam

Pulse width $\tau$	10μsec	100μsec	1msec	10msec	100msec
Repetition frequency					
$\tau \times 2$	50 kHz	5 kHz	500 Hz	50 Hz	5 Hz
$\tau \times 10$	10 kHz	1 kHz	100 Hz	10 Hz	1 Hz
$\tau \times 50$	2 kHz	200 Hz	20 Hz	2 Hz	0.2 Hz

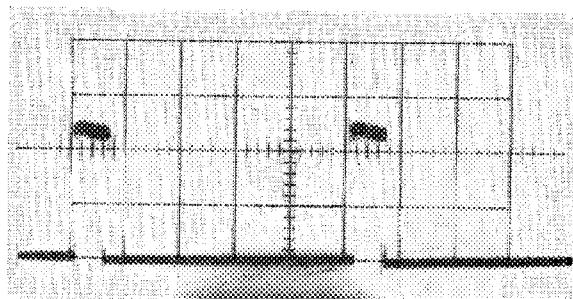


Fig. 30 The wave form of pulsed beam (pulse width : 100μ sec, duty ratio : 1/10)

定数を決めたマルチバイブルーターを用いて発生したパルスを増幅し、最終段は 4B13 を使用した。発生するパルスの仕様は TABLE 3 のとおりで、パルス幅は 5 段切り換えで、それぞれのパルス幅に対応してパルス間隔はパルス幅の 2, 10, 50 倍の 3 段切り換えができる。

電子線パルスの波形は電子線取り出し窓の下にアルミニウム板をおき、これをシンクロスコープにつないで観測した。そのパルス波形を Fig. 30 に示す。パルス幅が 100 μsec より長いときはよい矩形波が得られるが、10 μsec のパルスはかなりくずれた波形になる。これは

電子銃のフィラメントを直流点火しているが、その平滑回路として入れたインダクタンスによるものである。

## 5.6 電子線走査

電子線電流の走査幅は走査コイルに流す電流を制御することによって、電子線取出し窓面において 20~60 cm の範囲で変化し得るように設計した。おもな仕様は次のとおりである。

(1) 走査周波数は 200 Hz, 三角波

(2) 走査電流は最大 0.76 A (p-p)

(3) 走査コイル巻数は 5830 T

照射窓面において走査幅を一定にする場合には、電子線の加速エネルギーに対応して交流磁場の強さを変えなければならない。走査幅を 60 cm としたとき、塩化ビニールフィルム (厚さ 100  $\mu$ ) で測定した照射窓面における走査幅と電子線のエネルギーとの間には次式に示すように簡単な直線関係が得られた。

$$I = 0.24 E - 0.02$$

ここで  $I$  は走査コイルの電流 (A),  $E$  は電子線のエネルギー (MeV) である。

## 6. 線量の測定

### 6.1 概 説<sup>13)</sup>

1～数 MV の電子線、加速器の照射による線量分布は照射物質に入射する電子線の強度分布と深部線量分布の 2 つの測定から近似的に決定される。Fig. 31 におい

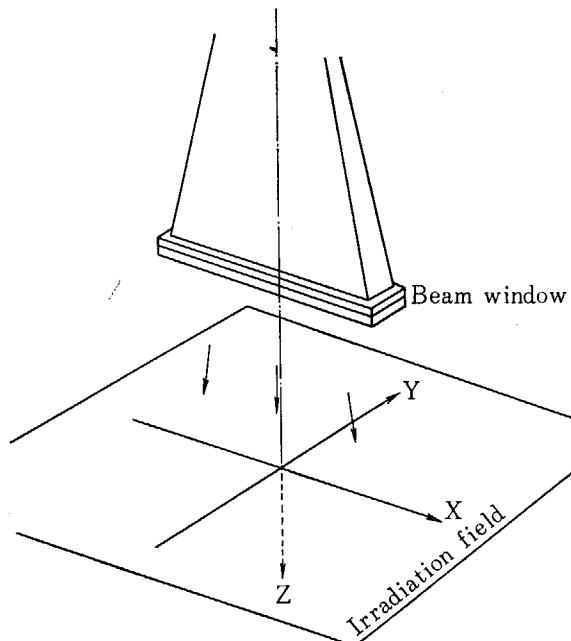


Fig. 31 Geometry of dose distribution measurement of electron beam

てビーム中心軸上の照射窓面より  $h$  の距離に照射面があるとすれば、強度分布は XY 平面内の吸収線量の相対的分布に相当する。また深部線量分布はビーム中心軸に平行な Z 軸方向の被照射物質中の吸収線量の分布に相当する。この方法が近似的に過ぎない理由は照射窓に用いているアルミニウム箔や空気中での多重散乱とエネルギー損失、および電子線走査によって下記のような面倒な問題が生じるからである。

- (1) 照射面に入射する電子線の角度分布は XY 平面内の各座標ごとに異なっているため、Z 軸方向の深部線量分布は XY 面上の各点で同じにはならない。斜入射の成分が多いほど、電子の Z 軸への射影飛程は短くなる。

(2) 上に述べた角度分布のために、XY 平面内の強度分布の測定にも相対的誤差が生じる。

(3) 照射面に入射するまでの照射窓と空気中での電子線の通過距離は XY 平面上の各入射点で異なるので、入射電子のもつ平均エネルギーは XY 平面の各点で異なっているはずである。

しかし、われわれはまず照射用加速器としての簡略化された線量分布を決定する目的から、上にあげた効果の補正是一応 2 次効果として無視することにした。

代表的な深部線量分布の測定は電子線中心軸と照射面との交点での静止照射により行なった。

### 6.2 強 度 分 布<sup>14)</sup>

単位時間当たり、単位面積当たりに入射する電子の強度分布（エネルギー束密度） $I$  は次式で与えられる。

$$I = \int_0^{E_{\max}} f(E) \cdot E \cdot dE \quad (1)$$

ここで  $f(E)$  は照射窓と空気層を通過したあとの入射電子線のエネルギー分布、 $E_{\max}$  は電子の最大エネルギーである。照射窓と空気層でのエネルギー損失は加速電子のエネルギーに比べて小さいので、入射電子エネルギーの平均値  $\bar{E}$  は、加速管内の電子エネルギー  $E_0$  と平均エネルギー損失  $\Delta E$  の差、すなわち  $\bar{E} = E_0 - \Delta E$  で与えられる。よって(1)式は簡単に次式となる。

$$I = \bar{E} \int_0^{E_{\max}} f(E) dE = \bar{E} \cdot \varphi$$

ここで  $\varphi$  は粒子束密度 (particle flux density) である。 $\varphi$  は入射電子線の電流密度に相当するものであるから、ファラデーカップによる電流分布測定で実測可能な量である。よって  $E$  を一定と考えれば強度分布はファラデーカップによる電流分布測定から得られる<sup>15)</sup>。

長軸方向（走査方向）の強度分布は横幅 1 cm の移動型ファラデーカップを遠隔操作で移動させることにより測定した。測定はすべて照射窓から 25 cm 下の照射面で行なわれた。ファラデーカップ以外に強度分布を簡便に測定する方法として、Polyethylene-terephthalate (P.E.T.P.) フィルムの着色を利用する方法がある<sup>16)</sup>。この方法では、波長 330 m $\mu$  でのフィルムの吸光度の増加がフィルムによる電子線のエネルギー損失（エネルギー

吸収量)に比例する。フィルムの厚さを  $\Delta x$  とすると、フィルム垂直に通過する電子のエネルギー損失  $\Delta E$  は  $\Delta x$  が十分小さければ、 $\Delta x$  に比例し、 $\Delta E/\Delta x$  は 0.5 ~ 3 MeV 程度のエネルギーでは、エネルギーの大きさによらずだいたい一定である。したがってフィルムの吸収線量の平面的分布はファラデーカップによる電流分布に等しくなると考えられる。この方法はフィルムの吸光度の増加の測定だけで電子線の強度分布が求められるので、ファラデーカップ測定よりも簡便であるうえに、短軸方向(走査方向と直角の方向)のような狭い範囲の分布の測定も容易に行なえるという利点がある。この方法の原理的欠陥は電子線がフィルムに対し入射する角度が増加すると、電子のフィルム中の通過距離(path length)が増加するために、その分だけ強度は見かけ上大きくなることである。この効果は照射窓の真下の位置からずれるほど、また空気層が増せば増すほど大きくなるが、分布の tail 部分を除いてはわずかであるから一応無視した。

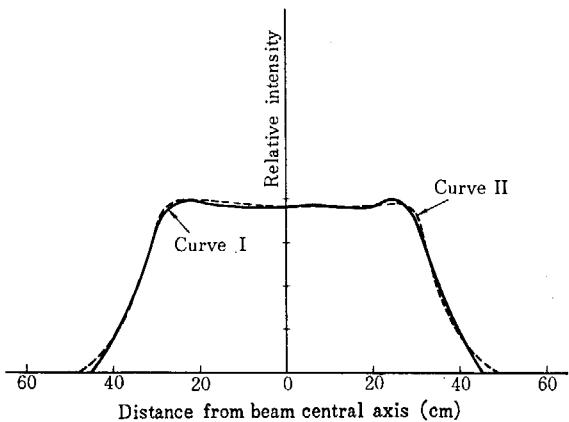


Fig. 32 Relative intensity distribution along the long axis (Full line (curve I) was measured by probe type Faraday cup. Broken line (curve II) was measured by P.E.T.P. films)

Fig. 32 は以上に述べた方法で得られた 2 MeV の電子線エネルギーに対する長軸方向の相対的強度分布である。Curve I は移動式ファラデーカップにより測定したものであり、Curve II は P.E.T.P. フィルムの着色の測定から得たものである。両者はピークの値で規格化されている。2 つの方法による測定結果は分布の形や幅においてだいたいよく一致している。P.E.T.P. フィルムの測定結果から分布の tail 部分を強度 0 へ外挿することにより求めた電子線の全幅は 91cm、平均強度以上の領域は 61cm、ピーク値の 90% 以上の強度領域は 51 cm であった。Fig. 32 に示した 2 MeV 以外の電子線エネルギーでも、1 ~ 3 MeV の範囲では、長軸方向の測定結果は強度分布の形においてほとんど同じであった。また分布幅が 2 MeV の場合の平均強度領域 (61 cm) に一致するように走査幅を調節することにより、

各エネルギーについてほぼ同一の強度分布が長軸方向で得られた。

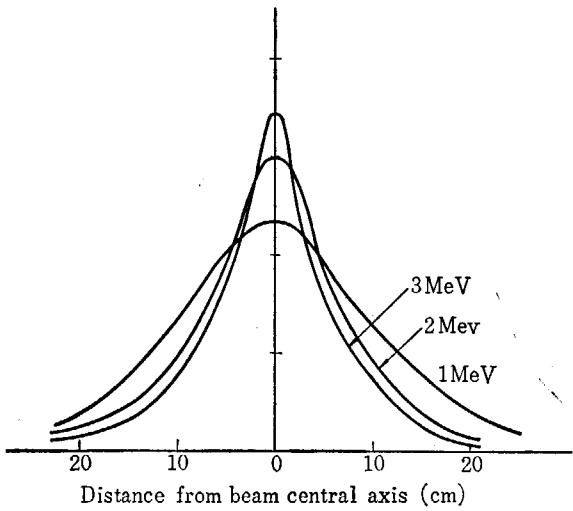


Fig. 33 Relative intensity distribution along the short axis (at 25cm under the beam window)

Fig. 33 は電子線中心軸を通る短軸方向の強度分布を P.E.T.P. フィルムを用いて測定した結果である。アルミニウム箔の照射窓での多重散乱のために、典型的なガウス型の分布曲線が得られた。電子のもつエネルギーが小さいほど散乱の割合は大きくなるから、1 MeV で最も幅広い分布がみられる。電子のエネルギーと電子線の広がりの関係は TABLE 4 に示した。ここで全幅とは分

TABLE 4 Relation between electron intensity and beam width along direction of short axis

Electron energy (MeV)	Total width (cm)	More than mean intensity (cm)	More than 90% of maximum intensity (cm)
1.0	71.5	28.8	5.8
1.5	63.3	23.0	4.8
2.0	54.1	18.2	2.8
2.5	54.3	17.0	3.2

布の tail 部分を強度 0 に外挿した場合の分布幅であり、平均値以上、あるいは 90% 以上と記してあるのは、それぞれ全幅に対して平均強度以上の領域幅およびピーク値の 90% 以上の領域幅を示している。中心軸を通る短軸方向の分布は中心から長軸に沿う両方向上の 33 cm の位置で測定された分布と比較したが、各エネルギーについて同一型の分布曲線が得られた。このことから長軸上の広い範囲にわたり、短軸方向の断面の強度分布は同一の形をしていることがわかった。

以上の P.E.T.P. フィルムを用いて得られた照射平面内の相対的強度分布を照射野における全電子流で規格化することにより、平均電子流分布、すなわち絶対的な平均強度分布が得られる

加速器から空気中に取り出される全電子流は次のようにして求めた。アルミニウムの照射窓を電子線が吸収されるのに十分厚いターゲットで置きかえて、ターゲットに流れこむ電流を測定し、その電流値からある一般条件のもとでの照射窓の吸収電流を差し引くことにより全電子流が得られる。この測定の結果、加速管内の電流のメーター指示値が 1 mA のとき、空気中に取り出される全電子流は 0.694 mA であった。

TABLE 5 は以上の全電子流で規格化された強度分布から各エネルギーにおける平均電子流密度を 3 つの方法で

TABLE 5 Relation between electron energy and mean current density

Electron energy (MeV)	$I_1 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$I_2 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$I_3 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$
1.0	0.148	0.376	0.695
1.5	0.168	0.482	0.693
2.0	0.198	0.614	0.951
2.5	0.197	0.621	1.09

求めた結果である。 $I_1$  は長軸、短軸の全照射野にわたる平均電子流密度、 $I_2$  は長軸、短軸の両方向についての平均電子流密度、 $I_3$  は各方向についてピーク値の 90% 以上の強度をもつ部分についての平均電子流密度である。

Fig. 34 は同様な関係を電子線エネルギーを関数として

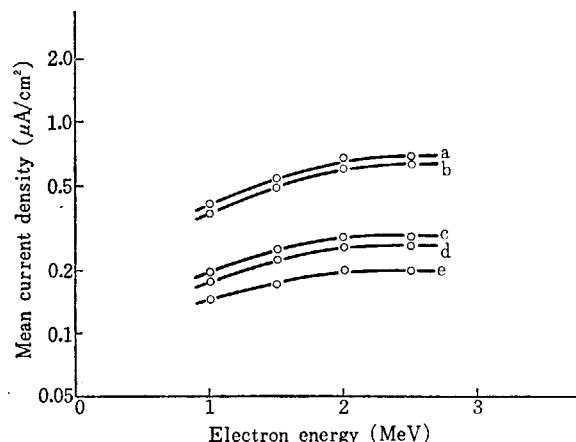


Fig. 34 Relation between mean current density and electron energy

- |   |                        |
|---|------------------------|
| a. short axis...for the intensity range larger than meanintensity | long axis...51cm width |
| b. " ... " "  | "...61cm width         |
| c. " ... " for the full width                                     | "...51cm width         |
| d. " ... " "  | "...61cm width         |
| e. " ... " "  | "...91cm width         |

電流密度の変化を示したものである。(a), (b) はそれぞれ長軸方向の幅が 51cm, 61cm で、短軸方向が平均値以上の幅の場合であり、(c), (d), (e) はそれぞれ長軸方向が 51cm, 61cm, 91cm で、短軸方向が全幅の平均をとった場合である。電子のエネルギーが 2 MeV 以

上では平均電子流密度はほぼ一定になる傾向が共通してみられる。

### 6.3 深部線量分布

数 MeV 領域の電子線によって照射された物質中の深部線量分布は一般に Fig. 35 に示されるような形とな

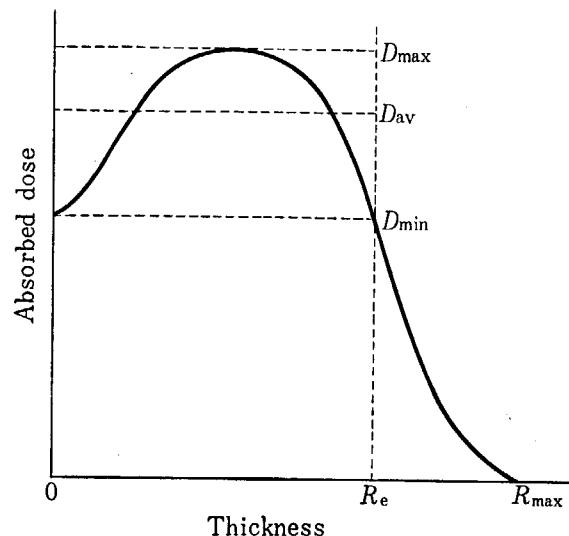


Fig. 35 Representative depth dose distribution curve

る。深部線量分布に最も寄与するのは入射電子のエネルギーであるが、たとえ入射電子のエネルギーが同じでも、物質の実効原子番号、入射電子のエネルギー分布や角度分布によっても深部線量分布は影響を受けるので厳密にはおのおのの照射条件で個々に決定されるべき性質のものである。しかし、それを実行することは一般的な照射業務では不可能であるから、まず最も適用しやすい代表的な深部線量分布を用意することが要求される。そのため代表的物質として P. E. T. P. (実効原子番号 = 6.24) を最も使用頻度の多い各種ポリマーの等価物質として選び、電子線の中心軸上で照射窓より 25 cm 下方の点で測定した深部線量分布が、XY 平面のすべての点での Z 軸方向の深部線量分布を代表すると仮定した。

深部線量分布の測定は今まで多くの方法で、各種の加速器に対して行なわれている<sup>16~25</sup>。Fig. 36 に 0.5~数 MeV 領域での加速器の電子線中心軸方向の深部線量の測定結果の代表例を 2 つ示した。(a) は TRUMP ら<sup>17</sup> がパン・デ・グラーフ型加速器を用いてアルミニウム中の電離電流分布の測定により得た結果であり、(b) は GUND ら<sup>18</sup> がベータートロンを用いて KCl 結晶中の dislocation の生成量の測定から得た結果であり、(c) は当研究所の共振変圧器形加速器を用いて、P. E. T. P. フィルムの着色を測定して得た結果である<sup>16</sup>。同じ電子線

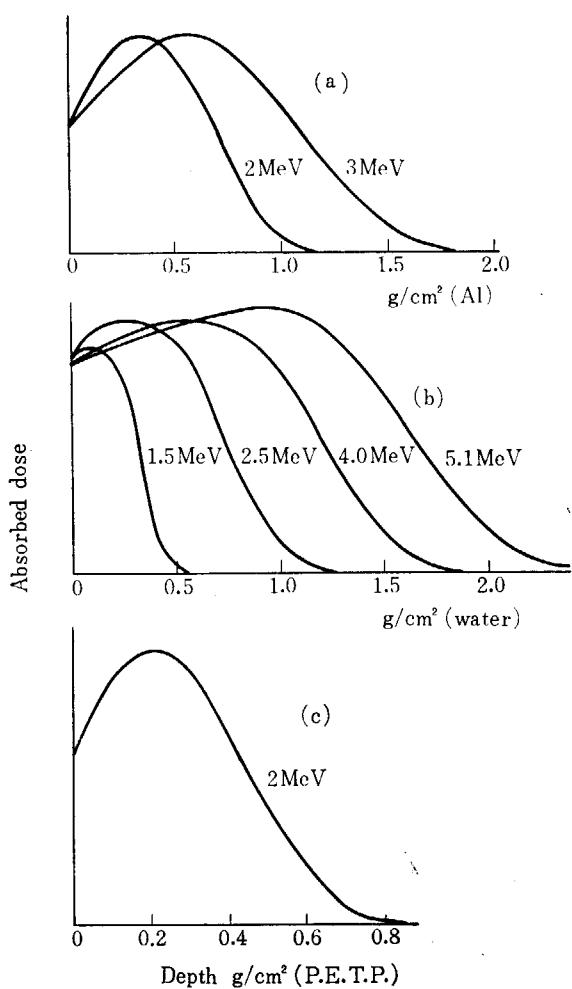


Fig. 36 Depth dose distributions measured by different accelerators  
a : TRUMP J. G. et al. (1950), Van de Graaff type Acc.  
b : GUND K. et al. (1948), Betatron  
c : OSHIMA Y. TANAKA R. (1967) Resonance transformer type Acc.

エネルギーでも、このような違った分布形になるのは前述のように照射方法、エネルギー分布、被照射物質の種類、その他に測定手段の相違も関係しているためと思われる。

飛程の問題については、加速器による一般の電子線照射の場合、深さ方向での吸収線量の均一性が問題になるので、最大飛程や外挿飛程よりも有効飛程  $R_e$  が重要なファクターになる。最大飛程は照射面に入射してくる  $0^\circ$  方向の成分の電子線の最大エネルギーの目やすを与えるが、照射物質の平均吸収線量を求めるときは実用的な量ではない。ここで有効飛程と定義されている量は最大線量を与える深さよりも深いところで深部線量が表面線量と等しくなる深さのことである。ただし、この有効飛程は入射電子が単一のエネルギーをもつ場合、表面線量値が最大吸収線量値の約 60% になるという経験的な実験結果をもとにしているので、この割合が 60% から

相当ずれている深部線量分布特性に対しては有効飛程を上のように定義するのは適切ではないと考えられる。

われわれは C-W 型加速器による電子線中心軸方向での代表的な深部線量分布の測定を P.E.T.P. フィルムの波長  $330\text{m}\mu$  での着色を利用する方法で行なった。照射は  $100\mu$  フィルムを最大飛程以上になるまで積み重ねて、フィルムの温度上昇を制御しながら行なった。吸光度の増加の測定は、照射されたフィルムを  $100^\circ\text{C}$  で熱処理したあと、一枚一枚別個に測定した。こうして得た深部線量分布は、照射物質が P.E.T.P. でなくとも、C, H, O のような元素を成分にもつ各種の有機物質に対してはそのまま適用できる。

Fig. 37 は P.E.T.P. フィルムを用いて得られた各エ

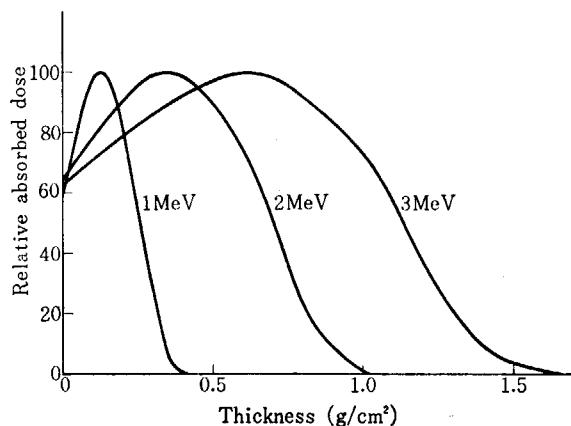


Fig. 37 Depth dose distribution measured by P.E.T.P. films

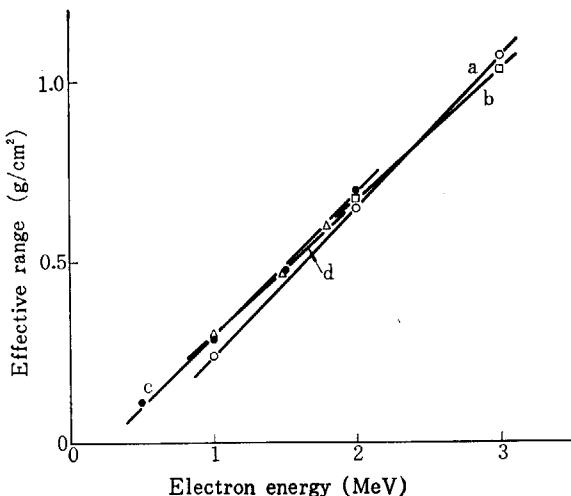


Fig. 38 Relation between effective range and electron energy  
a : JAERI, 3 MeV Cockcroft-Walton type Acc. (P.E.T.P.)  
b : TRUMP J. G. et al. Van de Graaff type Acc. (Al)  
c : AINGER H. et al. (cellulose diacetate)  
d : NAKAI Y. et al. (Al)

エネルギーでの深部線量分布曲線である。縦軸は吸収線量の相対値を示している。曲線の形は定性的には SPENCER の理論<sup>26)</sup>および TRUMP らの実験結果にだいたい類似している。電子線エネルギー  $E$  と有効飛程 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) の関係は Fig. 38 に示す。TRUMP ら<sup>22)</sup>は  $R_e = 1/3 E$  という単純な経験式を導き出したが、われわれの結果および AIGINGER, HUBBENY<sup>21)</sup>, 中井ら<sup>20)</sup>の実験結果では、各点を結ぶ直線は原点を通過せず、単純な比例関係をあてはめることは不可能である。2 MeV 以下のエネルギーではわれわれの値は他の値よりも低い傾向を示している。相違の原因としては実効原子番号の違いよりもむしろ入射電子のエネルギー分布、走査による角度分布などが関係していると考えられる。なお、われわれの結果から得た経験式は  $R_e(\text{g}/\text{cm}^2) = 0.414 E - 0.176$  であった。ここで  $E$  は入射電子のエネルギー (MeV) である。

以上の代表的深部線量曲線から各エネルギーについて、被照射物質の厚さ方向の利用効率  $f_a$ 、吸収線量の平均値、および物質内での吸収線量の不均一度の関係が求められる<sup>27,28)</sup>。これらの量は厳密には後方散乱物質の存在により多少影響を受けるが、ここでは後方散乱物質は被照射物質と同組成と仮定し、深部線量曲線のみから計算して求めた。Fig. 39 は深部線量曲線を積分して得られる利用効率と厚さの関係を示したものである。有効飛程に相当する厚さでの利用効率は各エネルギーについて 0.88~0.90 でほぼ一定であることがわかった。Fig. 40 はそれぞれの厚さについての相対的吸収線量の平均値を示したものである。Fig. 41 はある厚さで吸収線量の平

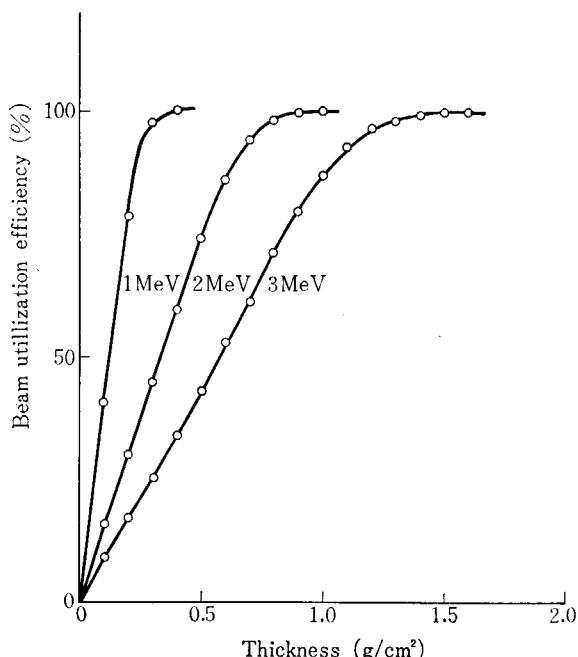


Fig. 39 Relation between the electron beam utilization efficiency and thickness for the total beam intensity.

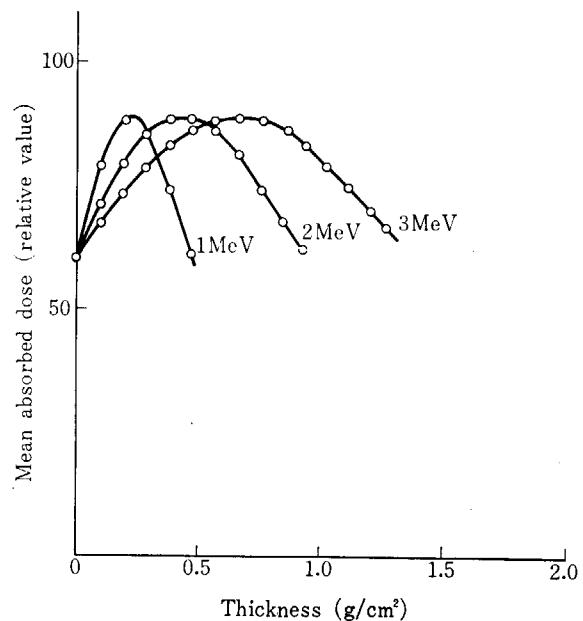


Fig. 40 Relation between mean absorbed dose and thickness ( $D_{\max} = 100$ )

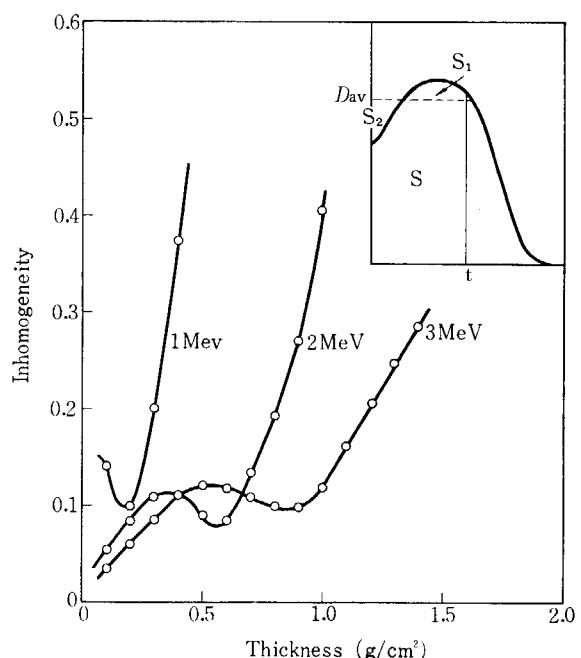


Fig. 41 Relation between integral inhomogeneity and thickness (inhomogeneity =  $S_1 + S_2/S$ )

均値に対する平均値からの偏差の比であらわされた不均一度と厚さとの関係を示したものである。不均一度は Fig. 41 に挿入されている図において、平均値をあらわす直線の両側の斜線部の面積  $S_1$  と  $S_2$  の和に対する深部線量曲線の積分値  $S$  の比で定義された量である。

## 6.4 平均吸収線量の算出

以上に述べた強度分布と深部線量曲線から照射面におかれた試料の平均吸収線量を各電子線エネルギーについて計算して求めた。吸収線量の算出はコンベアー移動照射の場合とコンベアーを用いない固定照射の場合の2つの方法にわけて行なった。いずれの場合も電子線電流はメーター指示 1 mA の場合を標準にし、照位射置は照射窓下 25 cm のコンベアー面上に統一した。

### 6.4.1 コンベアー移動照射

長軸方向（走査方向）の試料幅  $l$  cm, 厚さ  $R$  g/cm<sup>2</sup> の試料を短軸方向（走査方向と直角の方向）に、コンベアー移動速度  $v$  cm/sec で加速器の照射窓下を1回だけ通過させた場合の平均吸収線量  $D$  は次式のようにあらわされる。

$$D = \frac{f \cdot E \cdot I}{R \cdot v \cdot l} \times 10^5 \text{ rad} \quad (3)$$

ここで  $E$  は入射電子のエネルギー (MeV),  $I$  は試料幅  $l$  に含まれる電流密度の面積積分値 ( $\mu\text{A}$ ),  $f$  は厚さ  $R$  (g/cm<sup>2</sup>) における利用効率を示す。いま、電子線エネルギーを 2 MeV, 試料の厚さを有効飛程 (2 MeV のとき, 0.625 g/cm<sup>2</sup>),  $v=1.2$  m/min とすると,  $l=61$  cm のときは,  $D=1.96 \times 10^6$  rad となり,  $l=51$  cm のときは,  $D=2.15 \times 10^6$  rad となる。前述の条件のうち、電子線エネルギーだけを変化させたときの平均吸収線量と電子線エネルギーの関係は Fig. 42 に示す。ただし試料の厚さ  $R$  は各電子線エネルギーに等しいものとする。この場

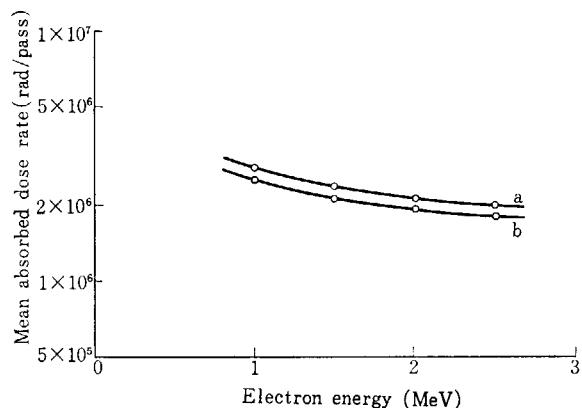


Fig. 42 Relation between mean absorbed dose rate and electron energy for the irradiation on conveyor (conveyer speed=1.2m/min, total current=1 mA).

a : Sample width 51cm  
b : " 61cm

合、吸収線量の平均値と最大値あるいは最小値の間のバラツキは、試料物体内の空間的な分布が問題になるので、深さ方向の約±20%以外に長軸方向の強度分布の相対的に少ないバラツキが重なることになる。

コンベアー移動照射における吸収線量率の表現法としては、Fig. 33 のような短軸方向（コンベアー移動方向）の強度分布のために、単に平均値としてあらわすが、あるいは必要に応じて最大値としてあらわす以外に方法はない。さらに 200 Hz の電子線走査による msec オーダーの線量率の不均一さやコンベアー往復運動による長時間オーダーの不均一さも加わるから、狭い意味での時間的に連続な線量率とは違ったものになっていることは注意すべきである。

### 6.4.2 固定照射

固定照射の場合は、コンベアー移動照射の場合のように短軸方向の強度分布が積分されずに、直接に平均吸収線量の決定に関係してくるため、平均吸収線量は被照射物質の平面的な大きさに強く依存すると同時に、短軸方向の大きさは均一な線量を照射しようと思うと非常に狭い範囲に限定される。平均吸収線量は(3)式と同様な考え方で下記のようにあらわせる。

$$D = \frac{f \cdot E \cdot I' \cdot t}{R \cdot S \cdot L} \times 10^5 \text{ rad} \quad (4)$$

ここで  $I'$  は試料の照射面に入射する全電流 ( $\mu\text{A}$ ),  $S$  は試料の短軸方向の幅 (cm),  $t$  は照射時間 (sec) である。いま仮に試料の大きさを TABLE 5 に示した短軸および長軸方向の強度分布の平均値以上の部分に等しくとり、試料の厚さ  $R$  を有効飛程に等しくとれば、2 MeV の場合の平均吸収線量率は、この 61 cm × 18 cm の板状物質に対して  $1.71 \times 10^5$  rads/sec となる。前述の条件のうち、電子線エネルギーを変化させたときの平均吸収線量率と電子線エネルギーの関係を Fig. 43 に示す。電子線エネルギーの高いところで減少する傾向があるが、

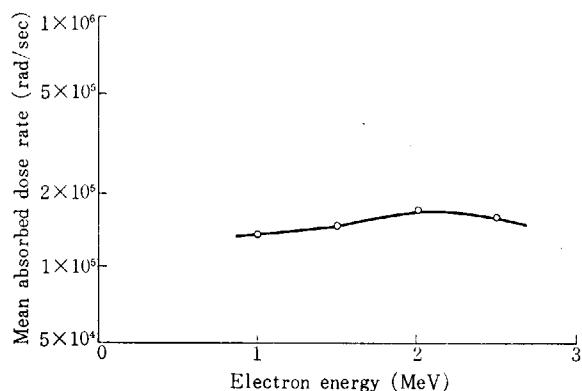


Fig. 43 Relation between mean absorbed dose rate and electron energy for the irradiation without conveyer running (sample size=61 cm×18 cm×effective range)

これは Fig. 8 に示したように  $E/R_0$  が単純な比例関係にないためである。吸収線量の平均値と最大値あるいは最小値の間のバラツキは短軸方向の強度分布幅が狭いため、試料の大きさが増すほど、増加する。また電子線

エネルギーが増加するほどバラツキは大きくなる。深さ方向のバラツキはコンベアー移動照射の場合と変わりない。

## 7. 工業利用における照射効率

### 7.1 照射効率

電子線加速器を実際の工業生産のプロセスとして利用する場合に、まず問題となるのは大気中に取り出された電子線をどの程度照射に利用することができるかといふ、いわゆる照射効率、さらには処理量についてであろう。一般的に照射用電子線加速器の照射効率 ( $F$ ) は、走査効率 ( $f_s$ )、放射線利用効率 ( $f_a$ )、空間効率 ( $f_b$ ) そして出力効率 ( $f_c$ ) の 4 種の効率を総合したものと考えられている。走査効率は電子線を走査しながら照射する場合、走査された電子線の照射野と照射に利用される面積の比であり、放射線利用効率は照射される試料の厚さ方向についての入射する電子線の利用の割合である。また空間効率および出力効率は、照射の方法および照射される試料によって決まるものであり、たとえば、走査された電子線の幅いっぱいの試料を照射する方法においては  $f_b$  は 100% となるし、また出力効率については、照射される試料の反応の形態、たとえばラジカル重合の場合では一般に線量率の  $1/2$  乗に比例して反応が起こるが、このような場合の加速器の出力とその反応の最適条件（この場合は加速エネルギーと電子線電流密度について）に関する効率である。

照射効率を求める場合、一般に電子線のエネルギーが  $1 \sim 3$  MeV の範囲においては、次の 2 つの要素によって決定される。

- (1) 照射される平面内における強度分布、すなわち電子線電流密度の分布
- (2) 照射物質中における厚さ方向についての深部線量分布

電子線電流密度の分布は、電子線を走査する幅、および照射窓から照射面までの距離によって変化する。本加速器においては、付属設備として大きさが  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$  のアルミニウム製のパレットをもったチェーン駆動式のコンベアーをスキャナーの下に設置し、これを照射に用いるようにしており、照射窓からこのパレットまでの距離は  $25\text{ cm}$  である。この面での電子線電流密度の分布は第 6 章でも述べたように走査方向については  $91\text{ cm}$  の間に、またコンベアーの進行方向に対しては、電子線のエネルギーによっておのおの異なった広がりをもつてい

る。このように電子線を走査する方向に対して直角の方向に照射する物質を流しながら連続的に照射を行なう場合には、走査効率は、走査方向についてだけ考えればよいことになり、この方向についての分布を数値積分し、これに対して照射する物質の横幅（走査方向についての長さ）が占める体積の比を求めればよい。たとえば、 $60\text{ cm}$  の幅をもつシートを照射する場合は、分布全体の体積を 1 とし、分布の中央部で照射を行なうとすると、 $60\text{ cm}$  の幅が占める体積は 0.88 となる。したがって、 $f_s = 0.88$  である。そしてまた分布図 (Fig. 44) にも示すように中央部はほぼ平坦であり、この  $60\text{ cm}$  の間での電流密度のバラツキは ± 5 % 以内である。

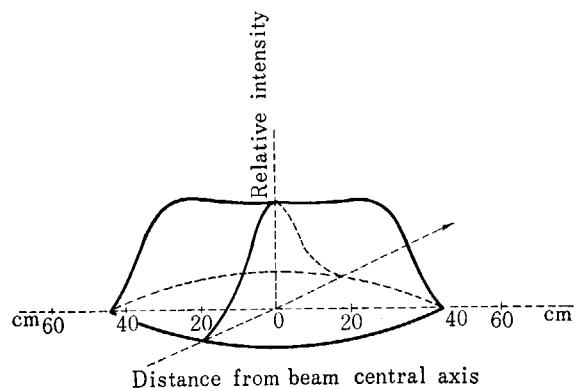


Fig. 44 Relative intensity distribution of electron beam

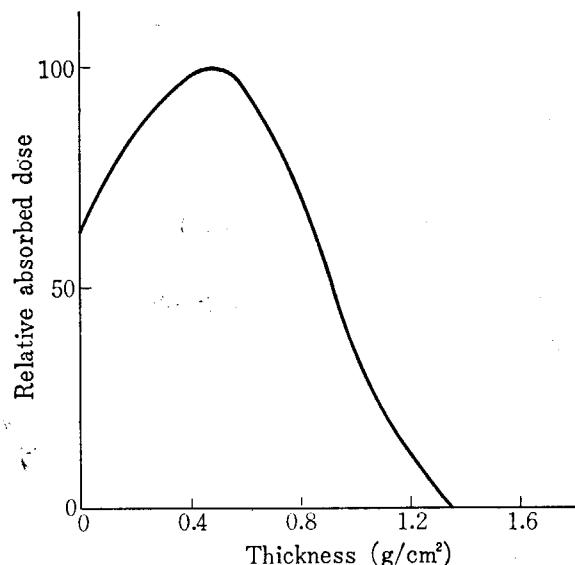


Fig. 45 Depth dose curve for 2.5 MeV electron beam measured by P.E.T.P. films

放射線利用効率  $f_a$  は照射物質中での深部線量分布曲線を測定することによって求められる。この測定は実際に照射する物質で行なうことが好ましいが、物質の形状などによって測定することが困難な場合には、ほかの実効原子番号が同じような物質で測定し、これを用いればよい。われわれは  $100\mu$  厚のポリエチレンテレフタレート・フィルムで深部線量分布曲線の測定を行ない (Fig. 45) 吸収線量の算出に用いているが、深さ方向での吸収線量の分布は照射物質の入射面から徐々に増加し、やがて極大に達したのち減少する。極大のところを 1 とした場合、電子線のエネルギーが  $1 \sim 3$  MeV の範囲では入射面の相対的な吸収線量は 0.6 くらいでだいたい一定である。一般に単一エネルギーの電子線照射を行なう場合には、深部線量分布曲線において、この入射面と同じ高さになるまでの横軸の長さを有効飛程(optimum thickness または effective thickness)  $R_e$  とよび、これを照射物の厚さをきめる目やすとしている。われわれが求めた深部線量分布曲線から電子線のエネルギーとこの有効飛程との関係を求めるとき、 $R_e(\text{g}/\text{cm}^2) = 0.414E(\text{MeV}) - 0.176$  という簡単な関係となり、高分子物質やその他実効原子番号が同じような物質を照射する場合、この関係から照射物質の厚さを求めるためには、照射物質の密度  $\rho$  の逆数をこの  $R_e$  に乘すれば求められる。そして、この有効飛程までの厚さでの電子線の利用効率は各エネルギーについてだいたい  $0.88 \sim 0.90$  で一定している。したがって照射物質の厚さをこの有効飛程に等しくした場合は  $f_a = 0.88 \sim 0.90$  となる。またこの有効飛程の間の吸収線量の平均値は、極大のところを 1 とした場合、 $0.82 \sim 0.85$  の範囲となり照射物質の深さ方向についての吸収線量のバラツキは  $\pm 20\%$  くらいである。

空間効率  $f_b$  は、照射する物質の形状、照射する方法等によって変化するが既述のコンベアーを使用して高分子物質のシート状のものを照射する場合、パレットとパレットとの間は照射されないから  $f_b$  をこの効率として考えたときは 0.80 となる。

以上述べたように幅  $60\text{ cm}$  の高分子物質のシートで厚さを  $R_e$  に等しくした場合の照射効率  $F$  は、出力効率を 1 として考えた場合、

$$F = f_s \times f_a \times f_d \times f_c = 0.62 \sim 0.63$$

となる。

一般に本加速器のようにスキャナを取り付けた形の電子線加速器で照射を行なう場合には、上述のコンベアーその他のシステムによる電子線の走査方向に対して直角の方向から利用するのが普通であるが、照射室の形状、あるいは試料の状態などによっては走査方向と同方向に利用する場合もありうる(たとえば、気体、液体などを流しながら照射する場合などに考えられる)。このような照射方法においては、電子線のエネルギーによって電流密度分布が異なり、またある程度均一な部分で照射

を行なうとすると照射幅は極端に短くなり、照射効率も落ちる。たとえば電子線のエネルギーが 2.5 MeV とした場合、中心部分で  $\pm 10\%$  以内のバラツキで照射できる幅は  $3.2\text{ cm}$  で、この部分の全体の分布に対する体積は 0.25 である。したがってこの場合の照射効率  $F$  は、0.22 となる。1.0 MeV の場合は照射できる幅は  $5.75\text{ cm}$  で  $F$  は 0.26 である。ただしこの場合も出力効率は 1.0 とし、照射物の厚さは有効飛程に等しくした場合である。

## 7.2 処理量

次に処理量の問題であるが、これは必要線量、照射物の大きさ、厚さ、コンベアー速度などを決めれば求められる。いま仮に照射物の横幅を  $60\text{ cm}$ 、厚さを  $R_e/\rho\text{ cm}$  にとり、ここでいう線量を前に述べた有効飛程までの平均値でとれば、照射物質中の平均吸収線量  $D_M$  は、

$$D_M = f_a \frac{E}{R_e} i \times 10^5 [\text{rad/sec}]$$

の式により求められる。ここで  $E$  は電子線のエネルギー、 $i$  は電子線走査方向の中央部  $60\text{ cm}$  をとった場合のコンベアーのパレット面上での平均電流密度である。この線量と電子線のエネルギーとの関係は、コンベアー速度を  $10\text{ m/min}$  とし、加速管の管電流を  $4\text{ mA}$  としたとき、Fig. 46 に示すようになり、照射物質の密度を 1 とし必要吸収線量を  $1\text{ M rad}$  としたときの処理量と、電子線のエネルギーとの関係を Fig. 47 に示す<sup>29)</sup>。本加速器の通常定格出力は 2.5 MeV, 4.0 mA であるが、

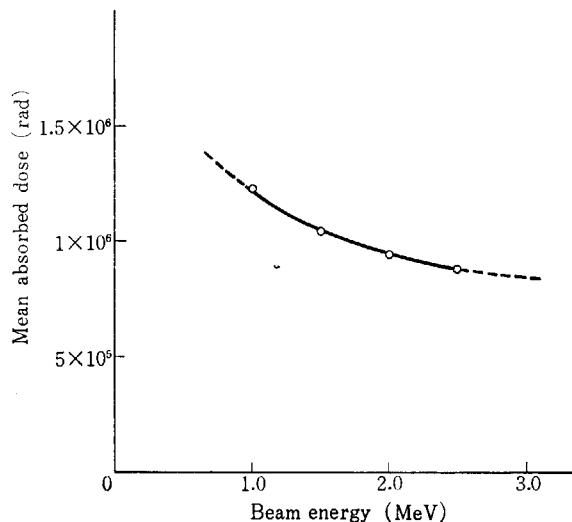


Fig. 46 Relation between the beam energy and the mean absorbed dose (The out put of the beam current maintained  $4\text{ mA}$  for each energy and conveyor speed  $10\text{ m}/\text{min}$  const.)

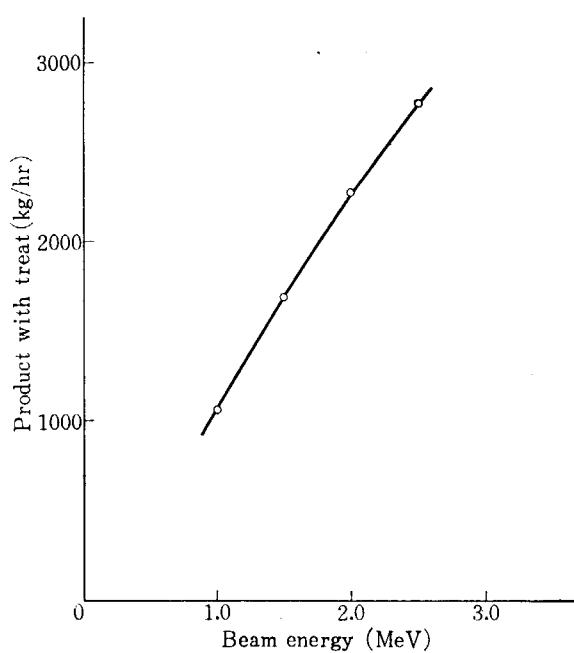


Fig. 47 Relation between the beam energy and the production capacity at 1 Mrad dose

この出力で上記の照射を実施した場合にはコンベアー速度は 8.8 m/min となり、これにコンベアーの空間効率 0.8 をかけ 7.04 m/min、横幅 0.6 m、厚さ 0.86 cm であるから、1 時間当たりには 2179 kg の処理ができることになり、この場合の照射効率は 0.64 となる。

### 7.3 電力的にみた効率

次に電力的にみた効率、すなわち入力側からみた効率を考えてみる。本加速器を運転するためには、高周波発電機駆動用誘導電動機 (M-G Set)，界磁コイル、電子銃、真空排気装置、その他制御系統に電力を依頼しなければならないが、これらの供給電力を電力計を使用して測定してみると、M-G Set を動作させるために必要な電力は 19.35 kW (3300 V, 3 相)、真空排気装置その他の制御系統、電子銃操作用プーリー発電機に対する供給電力は 8.44 kW (220 V, 3 相) であった。これは出力をまったくとらずに、また高電圧発生装置も昇圧しない状態での所要電力である。高電圧発生装置を昇圧した場合、および加速管から電子線電流を取り出した場合の発生出力と高電圧発生装置への電気入力との関係を Fig. 48 に示す。これらの測定は横河一簡易形電力計を用いて行なった。本加速器の所要電気入力は前にも述べたように Fig. 48 に示した高電圧発生装置への電気入力にさらに加速管の真空排気装置、制御系統への低圧入力

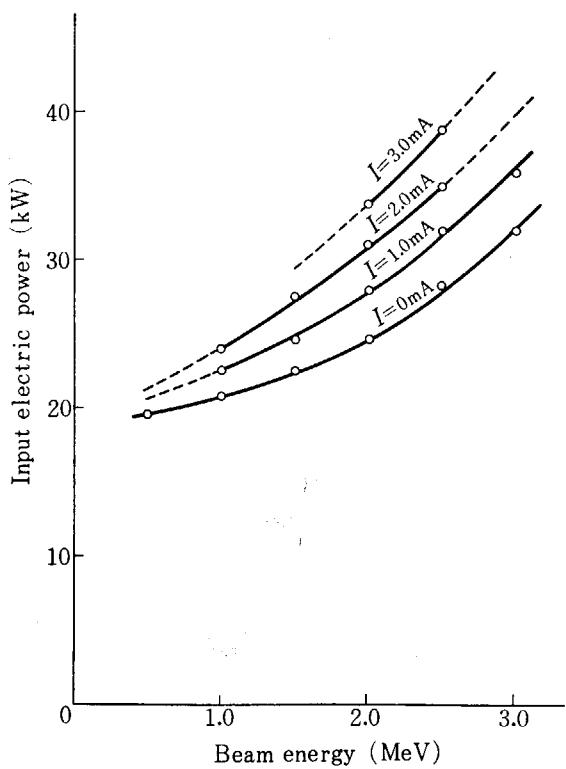


Fig. 48 Relation between the beam energy and the input electric power for several electron beam current ( $I$ )

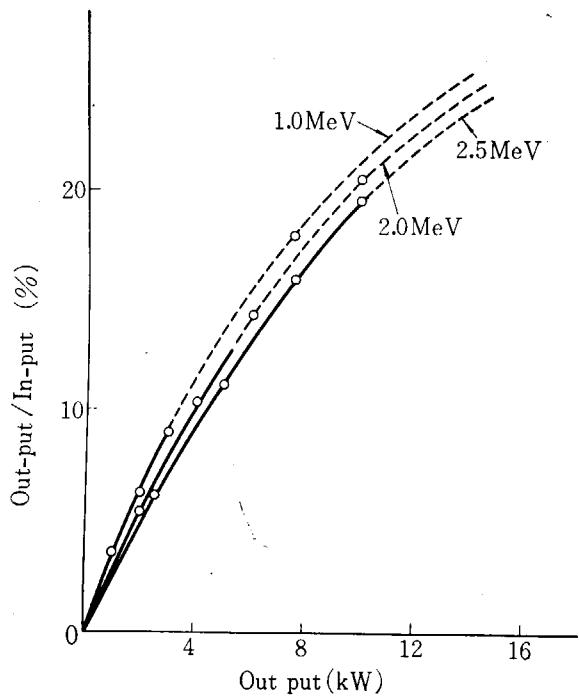


Fig. 49 Relation between the out put of the accelerator and the electric power efficiency

8.44 kW が必要である。したがって、本加速器の出力条件を 2.5 MV, 4 mA とした場合には高圧側所要電力 43.20 kW であるから、total として 51.64 kW の電力が必要であり、この場合の電力的にみた効率  $F_P$  は、

出力が 10 kW であるから 0.194 となる。加速器の出力と  $F_P$  との関係を Fig. 49 に示す。点線で示した部分は、実際には本加速器においては照射窓の関係あるいは加速管の段数との関係で測定することは不可能であるが、電子線を取り出しうる範囲での電力測定の結果、所要電力と取り出す電子線電流の間には各加速電圧について簡単な直線関係が得られたので、この値から推定して求めたものである。ここに示すように効率  $F_P$  は出力 10 kW 程度から徐々に飽和する傾向にあり、また加速電圧に対しては若干ではあるが加速電圧が低いほうが効率が高いことを示している。

このように電気的な入力エネルギーに対する出力エネルギーの変換効率は相対的に低く、また照射に用いる場合にはこの効率  $F_P$  に照射効率  $F$  が乗せられるわけであるから、たとえば 2.5 MV, 4.0 mA, 10 kW で照射を実施する場合には電気入力に対する利用効率  $P$  は、 $F_P$  は Fig. 48 から 0.194 であり、また  $F$  は空間効率、および出力効率を 1 として考えた場合、電子線のエネルギー 2.5 MeV に対しては  $F = f_s \times f_a = 0.88 \times 0.90 = 0.792$  である。したがって  $P$  は、

$$P = F_P \times F = 0.194 \times 0.792 = 0.154$$

となり、電気入力のうち 15.4% が照射に利用されることになる。本加速器の場合、このような意味での効率を改善するためには、高電圧発生部と 1 次側のマッチングの取り方、照射方法などに若干の余地はあるが、効率  $P$  が 20% をこえることは考えられない。

TABLE 6 Economics of accelerator operation

		Cost per one hour
1	Machine Cost : 77,000,000 yen Five year amortization's used for a total life of 40,000 hrs	1925 yen/hr
2	Building and Shielding : 30,000,000 yen Ten year amortization's used	342 yen/hr
3	Conveyer and Auxiliary equipment : 5,000,000 yen Using 40,000 hrs amortization	125 yen/hr
4	Tube cost : 3,000,000 yen Assume average tube life of 4,000 hrs	750 yen/hr
5	Insulating gas and other maintenance 1,500,000 yen/year	171 yen/hr
6	Labour cost : 2,000,000 yen/year	250 yen/hr
7	Power cost and other running cast	3,000 yen/hr
	total	6,563 yen/hr

その他加速器を工業的に利用する場合には、経済的な問題として加速器本体の価格、建屋（遮蔽、オゾン排気装置、コンベアなどを含む）、人件費、管理費などが問題となるが、当所のような研究所に設置される場合には照射する物質、目的も単一ではなく建屋などもこれに即したものではないので一概にはいえないが、加速管の耐用時間を 4000 時間とし、当研究所の施設をそのまま使用した場合、1 時間当たりのコストは 3600 円程度となり、これに加速器本体の償却費その他を加え合わせると 6600 円となる (TABLE 6)。前に述べた 2.5 MV, 4 mA, 10 kW の出力で、幅 60 cm, 厚さ 0.86 cm の高分子物質のシート状のものを 1 M rad 照射する場合には、照射コストは約 3 円/kg・hr となる。

## 8. 結 言

日本原子力研究所には東海研究所にすでに3台の加速器があるが、これらはすべてアメリカ製である。また高崎研究所の1号加速器もアメリカ製であり、本2号加速器は日本原子力研究所でははじめての国産加速器であるという点で意義深いものがある。C-W形加速器として最高電圧のものはスイスのバーゼル大学にある4MVの加速器で、当研究所のは世界第2位のものである。しかしバーゼル大学の加速器はイオン加速器であるために出力はせいぜい4kWであるのに対して当研究所のは照射用加速器であるために15kWの出力をもっている。

これまで日本にある国産加速器はパンデグラーフ形の加速器が数台あるが、照射用加速器は住友電工にある日新電機製のNS形加速器があるだけである。しかしこの加速器は1.3MV 3mA, 2MV 3mA, 1.5MV 20mAの3基で、大気圧形であり、出力の点でも取扱いの点でも本格的な照射用加速器として満足すべきものはいいにない。今回高崎研究所に設置した加速器はあら

ゆる点からみて本格的な照射用加速器であり、これにより線源の面から放射線化学の工業化に寄与するところ大きいものがあると考える。

本加速器は設置以来すでに2年以上稼動しているが、その間1年に1回のオーバーホールのときを除いてはタンクを取りはずして修理点検しなければならないような故障は一度もなく常に良好な状態で稼動している。われわれはこの加速器の運転経験および照射経験を基礎にして照射用としてさらに適した加速器の開発に努め、照射技術の開発に努力する必要がある。

本加速器の設計製作にあたり懇切なご指導をいただいた当研究所技術相談役である東京大学原子核研究所教授熊谷寛夫先生に感謝の意を表する。本加速器の製作にあたられた日立製作所国分工場の方々には並々ならぬ努力をしていただき、ここにお礼を申し上げる。最後に本加速器の計画のときから絶えずご激励をいただいた宗像理事長、沢柳所長に感謝する。

## 文 献

- 1) 大島他：日立評論49巻7号725頁1967
- 2) SUEMATSU S. et al. : *Nucl. Instr. Meth.* 52, 206 (1967)
- 3) BALDINGER E. : Kaskadengeneratoren, "Handbuch der Physik" XLIV, Springer-Verlag, 1959
- 4) KITAEV G. I. : Soviet Atomic Energy 14, 205 (1963)
- 5) 菅ノ又：応用物理 34, 733 (1965)
- 6) HARDWICK J. et al. : *Intern. J. Appl. Radiat. Isotope* 12, 20 (1961)
- 7) WAGNER D. et al. : *Nucl. Instr. Meth.* 6 238 (1960)
- 8) KOCH W. and MOTZ W. : *Rev. Modern Phys.* 31, 920 (1959)
- 9) BUECHNER W. et al. : *Phys. Rev.* 74 1348 (1948)
- 10) LEVIN S. : Nucleonics 12 (6) 54 (1954)
- 11) 電気学会技術報告 62号 (1964)
- 12) 菅ノ又：応用物理 36, 114 (1967)
- 13) BRYNJOLFSSON Ari and THAARUP Gunnar : Risø Report No. 53 (1963)
- 14) 中井, 井面, 松田他：放高研年報 3, 23 (1961)
- 15) LAUGHLIN S. : *Radiology* 63, 646 (1954)
- 16) 大島, 田中 : 応用物理 36, 515 (1967)
- 17) TRUMP J. G. and Van de GRAAFF R. J. : *J. Appl. Phys.* 19, 599 (1948)
- 18) CUND K. and WACHSMANN F. : *Strahlentherapie* 77, 593 (1948)
- 19) GRÜNEWALD Th. and SCHMIDT-LORENZ W. : *Atomkernenergie* 9-19, 143 (1964)
- 20) 中井, 井面, 松田, 木村 : 放高研年報 2, 25 (1960)
- 21) AINGER H. and HUBENY H. : *Atomkernenergie* 10-89, 479 (1965)
- 22) TRUMP J. G. et al. : *J. Appl. Phys.* 21, 345 (1950)
- 23) SALOVEY R. & ROSENZWEIG W. : *J. Polymer Sci. pt A. 1*, 2145 (1963)
- 24) DRESSEL R. W. : *Nucl. Instr. Meth.* 28, 261 (1964)
- 25) MARKUS B. : *Strahlentherapie* 97, 376 (1955)
- 26) SPENCER L. V. : *Phys. Rev.* 98, 1597 (1955)
- 27) RÜNEWALD Th. : *Kerntechnik* 7, 117 (1965) H. 3
- 28) RÜNEWALD Th. : *Kerntechnik* 8, 68 (1966) H. 2
- 29) 大島, 四本, 田中, 田島 : 第8回日本アイソトープ会議 報文集