



Title	ビーム停止時におけるLINACからの電子線漏洩
Author(s)	沢村, 貞史; Sawamura, Sadashi; 宮嶋, 良樹 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 73, 115-122
Issue Date	1974-12-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41245">https://hdl.handle.net/2115/41245</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_115-122.pdf



## ビーム停止時における LINAC からの電子線漏洩

沢村 貞史\* 宮嶋 良樹\* 住吉 孝\*  
村井 郁夫\* 谷田 弘明\* 片山 明石\*  
坂本 三郎\*\* 小澤 保知\*

(昭和49年6月29日受理)

### Electron Leakage from a LINAC at its "BEAM OFF" Condition

Sadashi SAWAMURA Yoshiki MIYAGIMA Takashi SUMIYOSHI  
Ikuo MURAI Hiroaki TANIDA Meiseki KATAYAMA\*<sup>1</sup>  
Saburo SAKAMOTO Yasutomo OZAWA

(Received June 29, 1974)

#### Abstract

Characteristics of leakage electrons from a 4 MeV LINAC which have been observed recently without applied anode voltage and in the absence of the heater current of the electron gun were presented.

Under these conditions of the LINAC, the measured maximum energy of leakage electrons was about 2 MeV which amounts to one half of the maximum energy of its full powered normal operation and the maximum dose rate was as high as one thousandth of that at the full powered normal operation.

The space distribution and time dependence of the dose rate are also measured.

#### 1. ま え が き

最近、北大4 MeV 電子線加速器において、加速器運転手順上では電子ビーム停止時であるにもかかわらず、加速管出口近傍で漏洩電子線の存在が見い出された\*\*\*。この漏洩電子線の最大エネルギーは約2 MeVで、加速管出口での線量は最大出力運転時の1/1000にも達し、漏洩線量としては、例えば加速器最大出力運転時の建屋周辺での漏洩線量に比べて非常に大きいものであった。しかも運転手順上ではビーム停止時であるため、実験者は加速器室内に立ち入る事が可能であり、加速器室内、特にビーム出口近傍での作業者に対する放射線安全の上で、この漏洩線の特性を明らかにする事が重要となった。

ここでは、新たに見い出された電子ビーム停止時の漏洩電子線のエネルギー、線量及びその空間分布、時間変化等の測定結果について報告する。

\* 原子工学科

\*\* 電気工学科

\*<sup>1</sup> M. K, to whom communications should be addressed.

\*\*\* 漏洩電子線の存在は、当時建設中であった45 MeV LINACにおいてもその徴候は見られ、他の多くの電子線加速器において存在する現象と推測される。

## 2. 漏洩電子線と加速器の状況

本稿で漏洩電子線と呼ぶときの“漏洩”の意味は従来から用いられている“加速器からの漏洩放射線”というときの“漏洩”とその意を異にしており、漏洩電子線の性質の正確な理解のためには加速器の概要を知る必要がある。

### 2.1 4 MeV 加速器の概要

図1に加速器全体のブロックダイアグラムを示す<sup>1)</sup>。マイクロ波電源としてはSバンドのマグネトロンを用いている。加速器本体は放射線防護の観点から、加速器室内の地下に掘られたピット（幅2.4 m、高さ1.95 m）の中に据付けられている。加速器室の前後は各々0.8 m、1.7 mのコンクリートでしゃへいされ、両側は高さ1.7 m、厚さ1.5 mの土盛りでしゃへいされている。本加速器の運転手順は(1)冷却系、(2)排気系、(3)マイクロウェーブ系、(4)集束磁場、(5)電子銃系の順で行なわれる。手順(1)～手順(4)により、加速器は電子ビーム加速可能な状態となり、この状態で手順(5)の電子銃を作動させ、電子ビームを加速管内に投入する事により加速される。排気系はロータリポンプと拡散ポンプからなり、到達真空度は加速管入口で約 $1 \times 10^{-6}$  mmHgである。加速管内へのマイクロウェーブ電力の投入、電子銃ヒータの点灯は真空度 $10^{-6}$  mmHg下で行なわれる。電子銃は2極管型で、ヒータ点灯後、陽極に高電圧パルスを加えて電子ビームを加速管に打ち込んでいる。

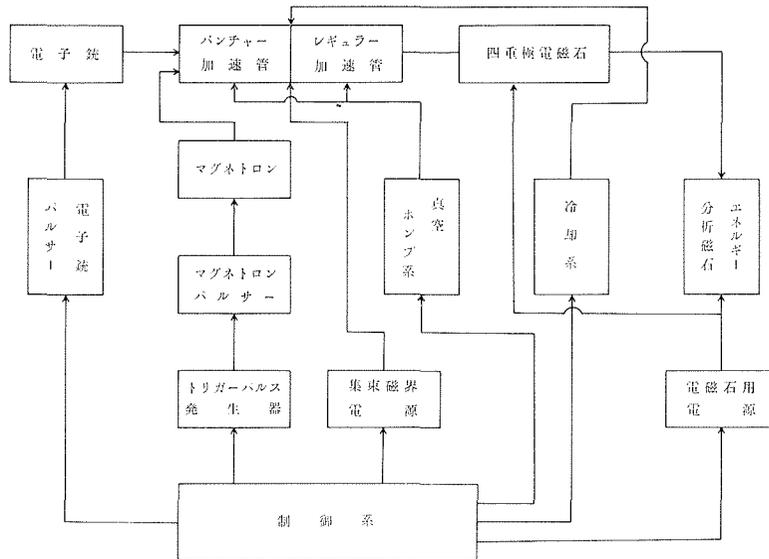


図1 4 MeV 電子線加速器の構成

### 2.2 電子線漏洩時の加速器の状況

さて、本加速器において加速器を出力運転状態とし、電子ビームを正常に加速するには2.1節で述べた運転手順(1)～(5)の操作を行なう。運転状態となった加速器を一時停止し、加速器室内へ入るためには運転手順(5)の電子銃系を停止する方法がとられてきた(電子銃系を停止する事により、加速器室へ通ずるドアのインターロックが解除される)。しかし、今回この状態(電子銃系のみ停止。運転手順中の(1)～(4)は作動)でも加速器のビーム出口近傍で最大エネルギーが約2 MeVに達する電子線の存在が見い出された。本稿では、この電子線を、運転手順上では

ビーム停止時であるにもかかわらず漏洩してくるという意味で漏洩電子線と呼ぶ。本漏洩電子線と従来の加速器からの漏洩放射線とは以下の点で異なっている\*。

1. 加速器は出力運転状態になっていない。
2. 漏洩してくる場所として問題にしているのはしゃへい体の内側で加速器室内、特にピット内である。

### 3. 漏洩電子線の測定

本章では、新たに見いだされた漏洩放射線の線質、エネルギー、線量等の測定結果について述べる。線質に関しては既に1, 2章で電子線である事を述べてきたが、本章ではその決定法について記す。線量測定に際し、当初GM管型、シンチレーション型及び電離箱型サーベイメータを使用した。その結果、前2者の指示値と電離箱型サーベイメータの指示値とは大きく異なり、前2者の測定器ではパルス状放射線特有の数え落としや積み重り現象により線量を正確に測定し得ない事がわかった<sup>2),3)</sup>。そのため以下の測定にはタケダ理研社製の球状電離箱(体積1000 ml, 直径14 cm)を用いた。なお、測定に際し、加速器は以下の条件で運転された。

1. 電子ビーム引き出し用高電圧=0 V
2. 電子銃ヒータ電流=16.2 A
3. マイクロウェーブ電力=0.65 MW
4. 集束磁場用電流=規定値に設定

#### 3.1 漏洩放射線の線質の決定

漏洩線の線源は電子線加速器であるから、その線質として電子線、 $\gamma$ 線(制動放射線)が予想される。両者の識別には磁場を用いるのがもっとも有効である。そこで、加速管出口後方に通常ビーム集束に用いられる四重極マグネットを装備した延長管を置き、延長管内を通る漏洩線に外部から磁場を印加できるようにした。電離箱を延長管出口に設置し、四重極マグネットの磁場の有無による電離箱の電離電流の変化を測定した結果、四重極マグネットのコイル  $Q_1$  に電流 ( $I_Q=2$  A) を流すと、電離電流は約1/2に減少した。この結果より、漏洩放射線の中に電子線が含まれている事は明らかである。また、後節で示す如く、ビーム状の鋭い空間指向性を有する事(図4)及びアルミニウム吸収曲線の形(図2)等が示す線質からこの漏洩線の中に主として含まれる成分は電子線であると結論した。この結果から、1, 2章で漏洩線を漏洩電子線と呼んだ。以下の章においても同様である。

#### 3.2 アルミ吸収特性と漏洩電子線の最大エネルギー

図2に漏洩電子線のアルミニウム中での吸収曲線を示す。これは加速管出口にアルミ製のコリメータ(孔面積1 cm<sup>2</sup>, 厚さ5 cm)を置き、コリメータ出口にアルミ吸収板を置いて測定したものである。ビーム状 $\gamma$ 線に対する吸収曲線は指数関数によく適合する事が知られており、片対数グラフでは直線となる。得られた吸収曲線は直線から大きくずれている。この結果も漏洩放射線が電子線である事を示している。図2から漏洩電子線の最大飛程  $R$  (mg/cm<sup>2</sup>) を求めると約1000 mg/cm<sup>2</sup> となる。電子線の最大エネルギー  $E_{\max}$  と最大飛程の間には、 $E_{\max} > 0.8$  MeV のとき、

$$R(\text{g/cm}^2) = 0.543 E_{\max} - 0.133$$

なる Glendenin と Coryell の式が成立する<sup>4)</sup>。上式より漏洩電子線の最大エネルギーは約2 MeV

\* 一般に加速器からの漏洩放射線と呼ばれているものは、その加速器が有している最大能力で運転されるとき、しゃへい体の外側へ漏洩してくる放射線を意味し、本加速器においても全出力運転時の漏洩放射線として報告されている<sup>1)</sup>。

である事がわかった。

### 3.3 漏洩電子線線量

#### 3.3.1 $\gamma$ 線用電離箱による 電子線線量測定

漏洩電子線の線量測定に $\gamma$ 線の電離箱を用いた。これは、当初漏洩線が電子線であるか $\gamma$ 線であるかの判定ができなかった事と電子線用の電離箱が備えられていなかった事による。電子線用と $\gamma$ 線用の電離箱の大きな相違点は側壁の厚さであり、 $\gamma$ 線用の電離箱を用いて電子線を測定すると、線量に寄与する相当の部分が壁内で吸収されてしまい、実際の線量値より小さい値を示す。したがって $\gamma$ 線用電離箱を用いて電子線線量を測定するためには側壁での吸収を補正する必要がある。また、電子線線量としてはラド単位の吸収線量率  $D$  (rad/h) を求める必要が

ある。空気での吸収線量は壁での吸収を補正した後の電離箱電離電流から直接求める事もできるが、上に述べた如く、当初その線質が不明であったため、電離箱の電離電流から照射線量率  $X$  ( $R/h$ ) を求めた。そこで本測定においては以下に示す(1)~(4)の手順で電子線線量を求めた。

- (1) 電離箱の電離電流から照射線量率  $X$  を求める。

$$I = \frac{X(R/h) v(\text{cm})}{3 \times 10^{10} \times 3600} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{760}$$

但し、 $I$ : 電離箱の電離電流 (A),  $v$ : 電離箱体積  $\cong 1000 \text{ cm}^3$ ,  $X$ : 照射線量率 ( $R/h$ ),  $T$ : 温度 ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $p$ : 圧力 (mmHg) であり,  $273/T \cdot p/760 = 1$  として計算した。

- (2) 電離箱側壁での吸収の補正

使用した電離箱の壁材質はアクリル樹脂で厚さ 5 mm, 比重約 1.2 である。アルミ等価厚に換算すると 2.2 mm (約  $600 \text{ mg/cm}^2$ ) となる。図 2 に示した漏洩電子線のアルミ吸収曲線において、原点で曲線に接線を引き、 $600 \text{ mg/cm}^2$  負方向に外挿する。外挿点での線量  $X_2$  と原点での線量  $X_1$  の比は  $X_2/X_1 = 1.4$  であった。これより、測定値  $X$  を 1.4 倍する事により、壁での吸収を補正する事ができる。

- (3) 補正した後の照射線量率  $X'$  から空気での吸収線量率  $D_{\text{air}}$  の算出

空気での吸収線量率  $D_{\text{air}}$  (rad/h) は、単位時間に単位質量の空気が吸収したエネルギーを  $E$  (erg/g, h) とすると、

$$D_{\text{air}} = 0.01 E$$

で与えられる。一方、照射線量率の定義と、空気中で 1 イオン対を生成するに要するエネルギー ( $W$  値) を  $34 \text{ eV}$  として、 $E$  は

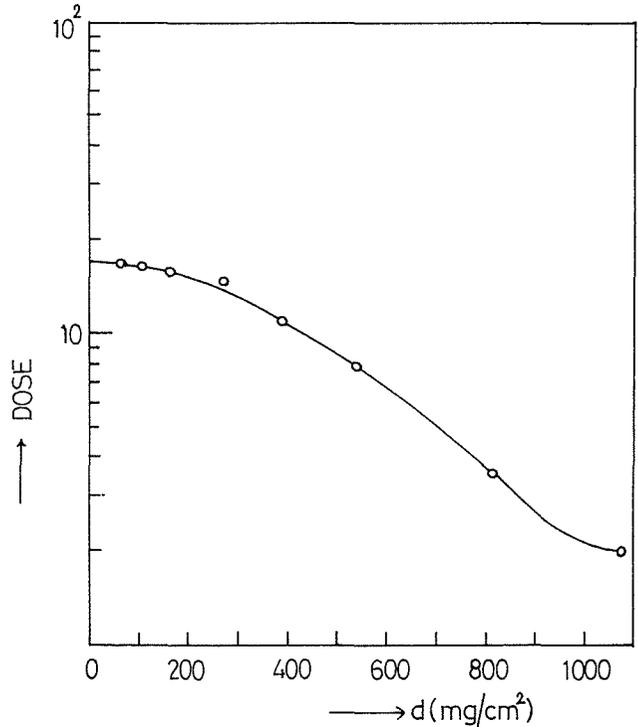


図2 アルミニウム中での吸収曲線

$$E = \frac{2.082 \times 10^9 \times 34 \times 1.6 \times 10^{-12}}{0.001293} X'$$

$$= 87.7 X'$$

として求められる。故に  $D_{\text{air}}$  は

$$D_{\text{air}} = 0.877 X'$$

となる。

(4) 水の吸収線量率  $D_{\text{H}_2\text{O}}$

$$D_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(s/\rho)_{\text{H}_2\text{O}}}{(s/\rho)_{\text{air}}} \Big|_{2 \text{ MeV}} D_{\text{air}} = 1.11 D_{\text{air}}$$

但し、 $(s/\rho)_{\text{air}}$ 、 $(s/\rho)_{\text{H}_2\text{O}}$  は空気及び水の質量阻止能である。 $D_{\text{H}_2\text{O}}$  を求める際には、漏洩電子はすべて 2 MeV (漏洩電子線の最大エネルギー) のエネルギーを有すると仮定し、2 MeV における空気と水の質量阻止能比は Attix<sup>5)</sup> 等の計算値を求めた。人体組織と空気との質量阻止能比は、電子エネルギーが 0.01~2 MeV の範囲内において、誤差 6% 以内で 1.13 と計算されており<sup>6)</sup>、 $D_{\text{H}_2\text{O}}$  によりかなり精度よく人体組織内での吸収線量を評価することができ、 $D_{\text{H}_2\text{O}}$  を求めておく事は重要である。なお、壁での吸収を補正した後の電離箱の電離電流から、直接  $D_{\text{air}}$ 、 $D_{\text{H}_2\text{O}}$  を求める方法と上の方法とは同一の計算結果を与える。

### 3.3.2 漏洩電子線線量の空間分布と時間変化

図 3、4 に漏洩電子線線量の空間分布を示す。図 3 は電子ビーム軸上の空間分布で、横軸は加速管出口からの距離、縦軸は加速管出口での線量値 ( $D_{\text{H}_2\text{O}}=618 \text{ mrad/h}$ ) で規格化している。図からわかるように、ビーム軸上の線量値はほぼ指数的に減衰している。図 4 は加速管出口から 50 cm 点で、ビーム軸に直角な断面での空間分布を示している。縦軸はビーム軸上 50 cm 点での線量値 ( $D_{\text{H}_2\text{O}}=128 \text{ mrad/h}$ ) で規格化している。図からわかるようにビーム軸から 15 cm ずれると線量値は 1/10 以下にもなる。これは漏洩電子線が鋭い指向性を持っている事を示

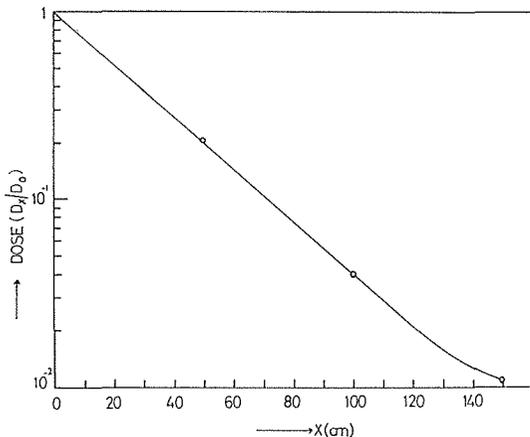


図 3 ビーム軸上での空間分布

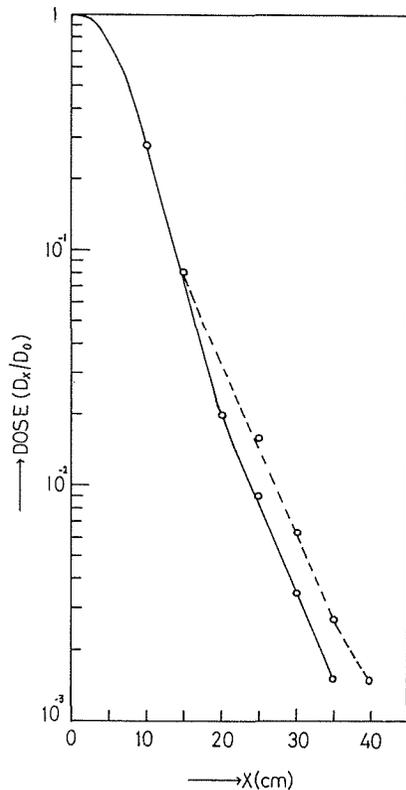


図 4 ビーム軸に直角な断面での空間分布  
破線は線源の時間的変動を補正したもの

している。

図5に漏洩電子線線量の時間変化を示す。測定点は加速管出口である。これは、加速器にマイクロウェーブ電力と集束磁場を投入した時刻からの時間変化を示したもので、時間の経過と共に減衰してゆく事がわかる。

### 3.3.3 種々の加速器運転状態と漏洩電子線線量

表1に加速器の運転条件を変化したときの加速管出口での漏洩電子線線量を示す。No.1の状態は正規の出力運転条件中、電子ビームを電子銃から引き出し、加速管内へ打ち込むための電子銃高電圧パルス  $V_G$  のみが存在しない状態である。このときの漏洩電子線による水の吸収線量率  $D_{H_2O}$  は 618 mrad/h と算出された。

No.2はNo.1の条件中、電子銃ヒータ電流  $I_h$  を 0 (A) にしたもので、 $D_{H_2O}=459$  mrad/h であり、No.1と比較して約70%にしか減少しない。No.3はさらに集束磁場を切ったときの値であり、 $D_{H_2O}=8$  mrad/h にまで減少する。No.4はさらにマイクロウェーブ電力  $P$  を投入しない場合であるが、このときには漏洩電子線は存在せず、線量値はバックグラウンドレベル (約 0.01 m R/h) にまで減少した。

$I_h=0$  でも  $D_{H_2O}$  が余り減少しない事は漏洩電子線が電子銃のヒータ電流に余り依存していない事を示している。しかし、表1中のNo.2の測定値は、実験手順として最初にヒータ電流を流してNo.1の測定を行なった後、 $I_h=0$  にして得られたものである。電子銃には電子ビーム引き出し用高電圧パルスが印加されていないので、 $I_h=0$  にしてもそれ以前にヒータから放出された電子が電子銃内に空間電荷として蓄積されており、この空間電荷が漏洩電子供給源となり、見かけ上電子銃に余り依存しない結果を与えているとも推測される。そこで、漏洩電子線と電子銃ヒータ電流との関係をより明確にするため、測定日を変えて図6の実験を行なった。図中、縦軸は電離箱の電離電流  $I$ 、横軸は経過時間  $T$  を示し、実線は電離電流、破線は加速管入口の圧力  $p$  を示す。測定点は加速管出口である。 $I=2 \times 10^{-11}$  (A) で  $D_{H_2O}=293$  mard/h である。A部では、加速器は  $I_h=0$ 、 $P=0.65$  MW でさらに集束磁場が印加された状態にある。電子銃ヒータは測定

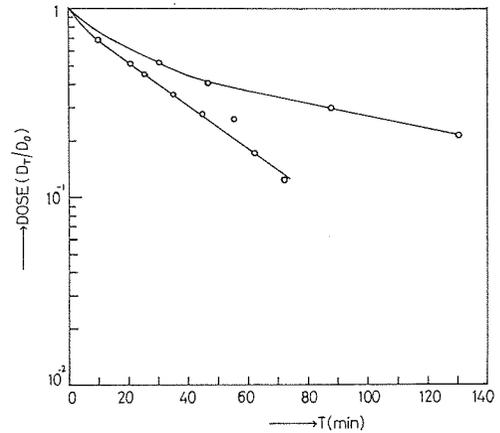


図5 漏洩電子線量の時間変化。縦軸は加速管にマイクロウェーブ電力と集束磁場を投入した時刻での線量  $D_0$  で規格化している。2本の曲線は測定日を変えた場合の減衰の違いを示している。

表1 種々の運転条件下に於る漏洩電子線線量

No.	$P$ (MW)		$I_h$ (A)		$V_G$ (V)	F. C		DOSE (mrad/h)	
	0.65	0	16.2	0	OFF	ON	OFF	$D_{air}$	$D_{H_2O}$
1	○		○		○	○		557	618
2	○			○	○	○		412	456
3	○			○	○		○	7	8
4		○		○	○		○	B.G	B.G

$P$ : マイクロウェーブ電力,  $I_h$ : 電子銃ヒータ電流,  $V_G$ : 電子銃高電圧, F.C: 集束磁場,  $D_{air}$ : 空気の吸収線量率,  $D_{H_2O}$ : 水の吸収線量率, B.G: バックグラウンド ( $\approx 0.01$  m R/h)

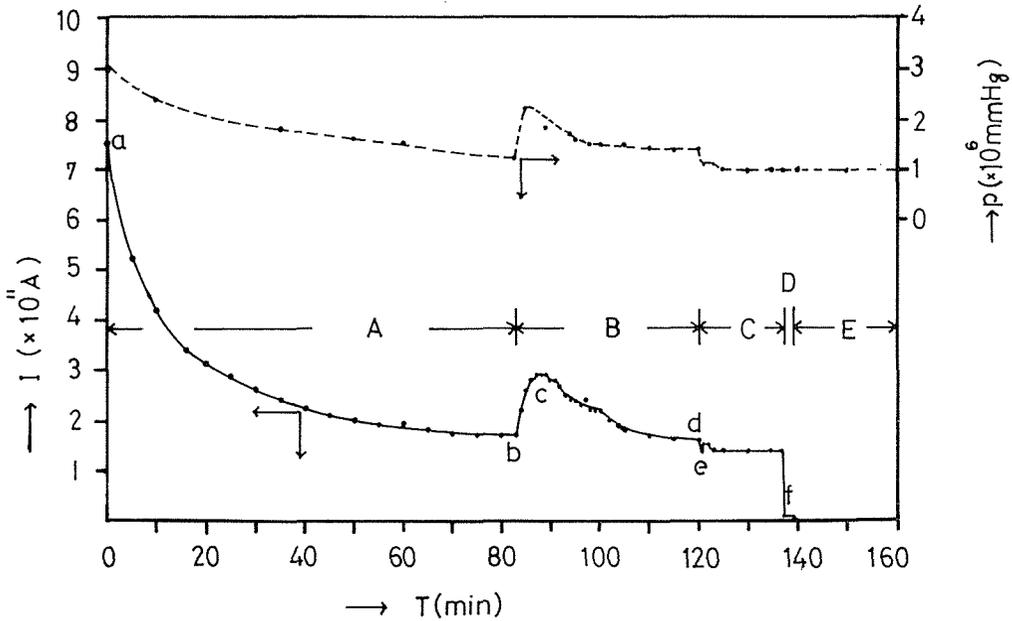


図6 漏洩電子線の電子銃ヒータ電流に対する依存性

- A:  $P=0.65$  MW, F.C=ON,  $I_h=0$  A      D:  $P=0.65$  MW, F.C=OFF,  $I_h=0$  A  
 B:  $P=0.65$  MW, F.C=ON,  $I_h=16.2$  A      E:  $P=0$ , F.C=OFF,  $I_h=0$  A  
 C: C=A

前には一度も点灯されていないので、電子銃内に空間電荷は存在していない。この状態でも a 点では  $7.5 \times 10^{-11}$  A,  $D_{H_2O} \doteq 1$  rad/h, b 点でも  $I=1.7 \times 10^{-11}$  A,  $D_{H_2O} \doteq 250$  mrad/h を示した。電子銃のヒータ点灯後 (B 部),  $I$  は c 点で最大値を示し ( $I=2.9 \times 10^{-11}$  A,  $D_{H_2O}=426$  mrad/h), その後減少して d 点においては b 点よりも小さい値になっている。e 点で再びヒータを切っても (C 部)  $I$  は余り変化しない。集束磁場を切ると (D 部),  $I=4 \times 10^{-13}$  A にまで減少し、マイクロウェーブ電力を切れれば (E 部) バックグラウンドレベルまで減少する事は表 1 と同様である。ヒータ点灯後, c 点までの  $I$  の増大は漏洩電子線の電子銃ヒータへの依存性を示しているようにも見えるが, その後, d 点まで減少する事, e 点での変化が小さい事, さらに A 部で B 部よりも大きな電離電流が測定された事から, 漏洩電子線線量はヒータ電流にほとんど依存していないと結論される。これに対して, 破線で示された圧力  $p$  の時間変化と  $I$  の時間変化は良い一致を示しており, 特に B 部での一致は重要である。b 点から c 点までの  $I$  の増加は, ヒータ電流を点灯した事による加速管内真空度の劣化によるものと推測される。図 7 は加速管入口圧力  $p$  と

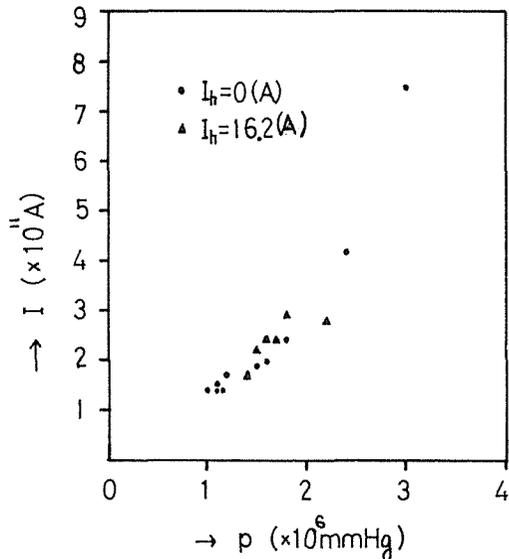


図7 漏洩電子線と加速管入口圧力の関係

電離箱の電離電流  $I$  の関係を示したものであり、●印は  $I_h=0$ 、▲印は  $I_h=16.2$  A のときの測定値である。両者はほぼ同一の圧力依存性を示し、この結果も漏洩電子線はヒータ電流に依存せず、加速管内真空度に依存している事を示している。

さて、本加速器の最大出力運転時における加速管出口での電子線線量は、フリツケ線量計により、約 1 krad/パルスと測定されており、単位時間当たりには換算すると (周波数 100Hz, パルス幅  $2 \mu$  sec として)  $2 \times 10^{-1}$  rad/sec となる。他方、表 1 中の No. 1 の運転条件下での漏洩電子線線量は約  $1.7 \times 10^{-4}$  rad/sec となり、両者の比はわずかに約 1/1000 である。また最大出力運転時でのピーク電流は約 100 mA であり、この値から漏洩時での 1 パルス当たりに含まれる電子の個数を求めると約  $10^9$  個/パルスとなる。前述した如く、漏洩電子線線量は電子銃ヒータ電流に余り依存していない事から、最大出力運転時の 1/1000 にも達する大漏洩電子供給源を電子銃以外に見出す必要があるが、現在の所、未だ明確ではない。本実験からは、漏洩電子線線量はマイクロウェーブ電力、集束磁場、加速管内圧力に依存している。加速管内に約 0.65 MW のマイクロウェーブ電力が存在するときの高周波加速電界は加速管軸上で推定約 2 kV/cm $\sim$ 7 kV/cm であり、仮に加速管内に自由電子が存在すれば、残留ガスを電離したり加速管内面の  $A_n$  から 2 次電子を放出させ得るに必要なエネルギーを自由電子に与え得る。しかし、加速管内真空度が加速管入口での真空度と余り違わないときには、その真空度は  $10^{-6}$  mmHg であり、残留ガスを空気として電離係数  $\alpha$  を推定すると  $\alpha=10^{-5}$  個/cm となり、 $\alpha$  は非常に小さい。だが、加速管内の実際の圧力が真空計の設置されている加速管入口での圧力より高い値を示しているとすれば、残留ガスの電離による効果も重要になってくる。また、加速管内面に多数のガス分子が比較的安定に吸着しており、これらの分子が電子供給源になっている事も考えられるが明確ではなく、漏洩電子供給源に関してさらには調査が必要である。

#### 4. む す び

今回、見い出された漏洩電子線は加速器の運転手順の上ではビーム停止時であるにもかかわらず、マイクロウェーブ電力と集束磁場が加速管内に存在するため、最大エネルギーが約 2 MeV のパルス状電子線となっており、強度も最大出力運転時の約 1/1000 にも達する。これは、加速器を正常に低出力で運転しているときと同等の電子線が漏洩しているとも考え得る。漏洩電子の供給源は、現在の所、未だ明確ではない。測定結果は電子銃のヒータ電流に余り依存していない。その強度が最大出力運転時の 1/1000 にも達する大漏洩電子供給源については、さらに調査が必要である。しかし、少なくとも漏洩電子供給源はマイクロウェーブ電力を切れば直ちにバックグラウンドレベルまで減少するので、実験中、加速器室へ入る時には電子銃系のみならず、マイクロウェーブ電力も切る事が必要であり、現在では加速器室へ通ずるドアとマイクロウェーブ系の間にもインターロックが設置され、電子線が漏洩している状態で実験者が加速器室へ入る事のないように改良された。

#### 参 考 文 献

- 1) 小澤保知編：北海道大学 4 MeV 電子リニアックの研究 (昭 47), p. 26, HUAL-7201.
- 2) 小澤保知, 成田正邦, 加地郁夫：日本原子力学会誌, 5 (昭 38), 3, p. 190.
- 3) 沢村貞史, 小澤保知：日本原子力学会誌, 14 (昭 47), 4, p. 152.
- 4) 三宅泰雄他編：放射化学ハンドブック (昭 37), p. 69, 朝倉書店.
- 5) Attix, Roesh, Jochlir: Radiation Dosimetry Vol. I, 2nd, ed. (1969), p. 191, Academic Press.
- 6) 西野治監修：プライス放射線計測 (昭 41), p. 106, コロナ社.