

6 MeV 線形電子加速装置の試作

Construction of the Hitachi 6 MeV Linear Electron Accelerator

沢田 良 嘉*
Ryōka Sawada

近藤 弥 太 郎*
Yatarō Kondō

木 村 浩 浩*
Hiroshi Kimura

前 川 明 嗣*
Akiji Maekawa

御子柴 佑 恭*
Tomoyoshi Mikoshihira

武 田 康 嗣*
Yasutsugu Takeda

黒 田 邦 茂*
Kunishige Kuroda

十 河 英 士*
Hideji Sogō

内 容 梗 概

線形電子加速器は第2次大戦中に発展した大電力マイクロ波の技術を基にして戦後急速に開発されつつある。日立製作所中央研究所においては工業的応用および加速器自体の研究を目的として、出力エネルギー6 MeV、平均電流90 μ Aの線形電子加速装置を試作した。特に電源を簡単にするためマイクロ波電源には大電力マグネトロンを用いたが、アイソレータを用いることにより安定な運転に成功した。そのほか、本装置は加速管に独自の組立式を採用した、電子銃は直流加速、第1陽極パルス制御の三極管方式とシンター陰極を用いた集群部、光速部加速管の間に移相器をそう入したなどの特色を持っている。本論文ではこの装置の構成、加速管の設計、主要構成部品の性能および出力ビームの測定について述べる。出力ビーム測定の結果、当初の目標を上回る7~8 MeV、90 μ Aの性能を確認した。

1. 緒 言

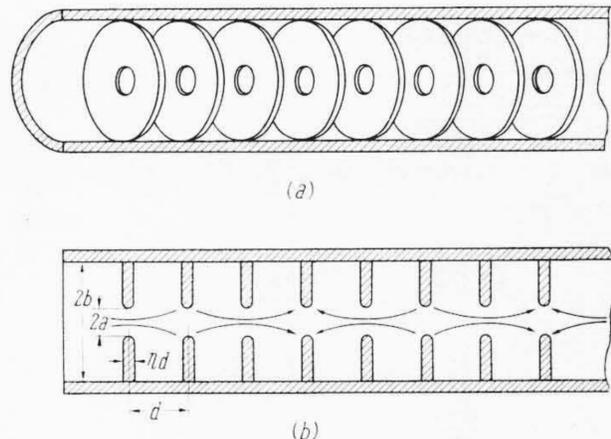
現在世界各国において物理実験用を始めとして工業用、医療用などに大小各種の加速器が利用されていることはよく知られている。その中でも線形加速器の原理は比較的古くから知られていた。1928年 R. Wideröe は約1 Mc, 25 kVの交流電圧を電極に加えてKイオンを50 KeVに加速し、続いて D. H. Sloan らは10個以上の電極を用いて Hg イオンを1~2 MeVに加速した。しかし、その後 E. O. Laurence によるサイクロトロン⁽¹⁾の発明や D. W. Kerst によるベータトロンの完成、McMillan などによるシンクロトロン⁽²⁾の提案など環状加速器の目ざましい発展のために、高周波電界を使った線形加速器はあまりかえりみられなかった。ところが第2次大戦中レーダーの開発のため大電力マイクロ波技術が著しく発達し、戦後これを加速電源とした線形加速器、特に線形電子加速器(Linear Electron Accelerator; Linac, リニアクと略称する)がまずアメリカおよびイギリスにおいて続々と製作されるようになった。

進行波形リニアクの原理は円形導波管中を進行する TM_{01} 姿態のマイクロ波の進行方向電界を利用して電子を加速しようとするものである。しかもこの加速を導波管の全長にわたって行なうためにはマイクロ波の位相速度を電子の進行速度とほぼ一致させる必要がある。このために加速用導波管(以下リニアクの加速管と呼ぶ)の構造は第1図に示すように、中央に穴のあいた円板を装荷したひだ付き導波管(disk-loaded waveguide)になっていて電波に対する遅波回路を構成している。第1図(b)はこの加速管中の電界の様態を示しているが(図示のような場合を $\pi/2$ モードと呼ぶ。リニアクにはこのほか π モードや $3\pi/2$ モードが使われている)、この電界は時間的には加速管に沿って進行しながら電子を加速することになる。使用されるマイクロ波はマグネトロンやクライストロンによって発振、増幅され、その波長は10 cm 付近(Sバンド)が最もよく使われているが、23 cm (Lバンド)や3 cm (Xバンド)のものも現われている。

線形電子加速器のおもな応用分野は、

(1) 高エネルギー核物理実験用: この代表的な例として Stanford 大学の1 BeV (=10⁹eV)のリニアクがあるが⁽³⁾、現在同大学ではさらに45 BeVを目指して長さ2マイルに及ぶリニアク

* 日立製作所中央研究所



第1図 線形電子加速器の加速管構造

クを建設中である。わが国では原子核研究所の1 BeV電子シンクロトロンへの入射用に、6 MeVのリニアクが建設された⁽²⁾。

(2) 工業用: ラジオグラフィー用や放射線化学用線源として使われている。特に後者の目的には大電力のリニアクが必要で加速器出力にして60 kWの例もある。

(3) 医療用: 主として10 MeV以下のエネルギーのものが使われ、照射に便利のように小形で可動形のものが多い。

(4) 中性子源としての応用: 放射化分析や短半減期のアイソトープ生産(原子炉では生産できない核種も多い)、さらに time-of-flight 法による原子炉構成材試験などに用いられる。

(5) 消毒、殺菌など: 注射針、外科手術用縫糸やほう帯の消毒、食料品の滅菌、保存などがアメリカでは工業化されている。

(6) その他: リニアクからの強力な放射線による各種の実験により、未知の応用分野が探究されている。

日立製作所中央研究所では工業的応用と加速器自体の研究を目標に独自の方式によるリニアクの試作研究を行ない、昭和36年4月装置の完成をみた。建設の経過、加速管の設計、装置の構成、出力ビームの特性などについてはすでに一部報告したが⁽³⁾、以下これらについてさらに詳細に説明する。

2. 試作装置の設計

2.1 装置の構成

第1表にわれわれが試作したリニアクの性能の目標値および実測値を示す。また第2図に装置の構成のブロック・ダイアグラムを、第3図に装置の全景を示す。

第2図に示すように加速管は集群部と光速部に2分されている。集群部 (Bunching Section, Buncher) は二つの役目を持ち、電子銃から入射された $0.5c$ の速度 (c は光の速度、入射電圧約 80 kV) の電子を $0.98c$ (運動エネルギー 2 MeV) の速度まで徐々に加速すると同時にマイクロ波の一定位相角付近に電子を集群 (Bunching) して、次の光速部加速管 (Regular Section) で有効に加速を行なわせる必要がある。このために集群部加速管中のマイクロ波の位相速度はあとに述べるように電子の速度に合わせて進行方向に沿って変化してゆく設計になっている。光速部加速管中では電子はほとんど一定速度であるため、マイクロ波の位相速度も光速度一定でよい。

われわれは本装置の製作にあたって工業用リニアックとしてコンパクトな使いやすいもの、安価で安定なものを目標として設計し、特

に次のような特長をもつリニアックの試作を完成した。

(1) マイクロ波源としてマグネトロン QK-327 (せん頭出力 4 MW , 平均出力 3 kW , 周波数 $2,700\sim 2,850\text{ Mc}$ 連続可変, パルス幅最大 $2\ \mu\text{s}$, くり返周波数最大 360 pps) を用いた。マグネトロンを用いることにより第2図でもわかるようにマイクロ波電源は非常に簡単にすることができた。しかも本装置はマグネトロン1本を電源にもつリニアックとして世界最大のものであり、かつアイソレータを用いることにより $\pm 100\text{ kc}$ 以下の周波数安定度で運転することができる。

(2) 加速管は無酸素銅製の円板と円筒を日立製作所独自の方式で組み立てることにより、簡単で安定なものを完成した。本方式によれば円板、円筒の全数検査ができ、しかも加速管の周波数精度に最も影響する $2b$ (円筒内径, 第1図参照) の実測が十分できるし、加速管表面の酸化を防ぐための金の薄メッキ ($0.25\ \mu$ 厚) も円板、円筒とも行なうことができる。また出力エネルギー $7\sim 8\text{ MeV}$ の割合に比較的短い加速管 (16自由空間波長) の設計に成功した。

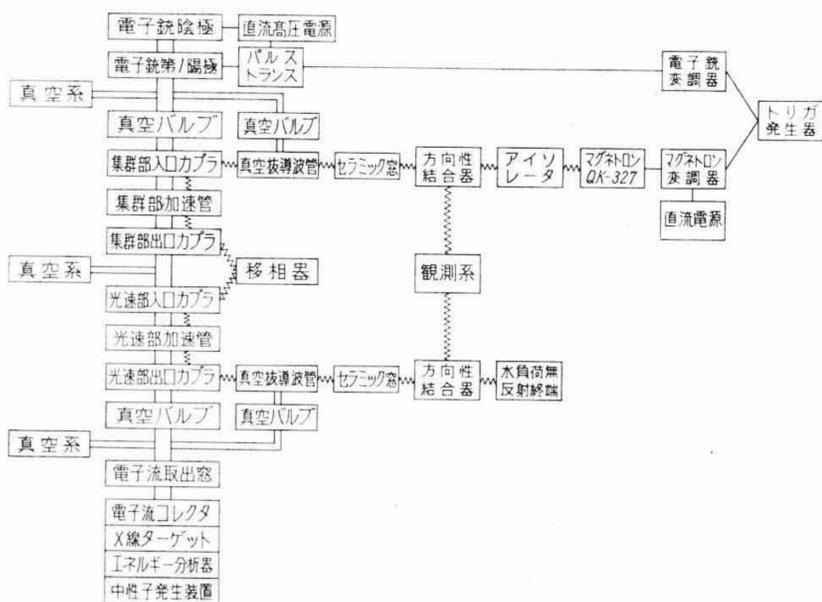
(3) 集群部と光速部加速管の間に移相器をそう入した。これによって得られる利点は出力電子エネルギーの制御が簡単にできること、マイクロ波電源の周波数ドリフトや加速管の温度変化に対しても移相器の調節によって性能を一定に保ちうること、したがって加速管設計の許容精度も楽になることなどである。また移相器としては円偏波移相器を試作し、せん頭電力 5 MW まで使用可能なことを確かめた。

(4) 電子銃はピアース形で直流加速、第1陽極パルス制御の三極管方式を採用し、直流耐圧 90 kV 以上の第1陽極制御用パルス・トランスを開発した。本方式の利点は直流加速であるため入射電圧一定となり、安定な出力ビームが得られたこと、第1陽極制御により電流変化が容易に、しかも時間遅れなく行ないうることなどである。また電子銃陰極にはシンター陰極を用いたが任意の曲面に切削できること、使用温度が低く大電流密度が得られること、数10回空気にさらしたのちも再活性化が容易であるなどの特長をもっている。

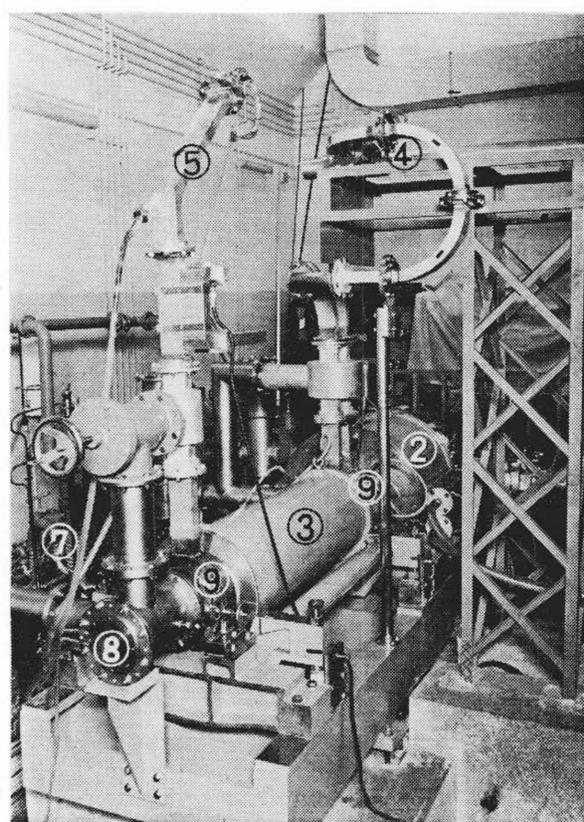
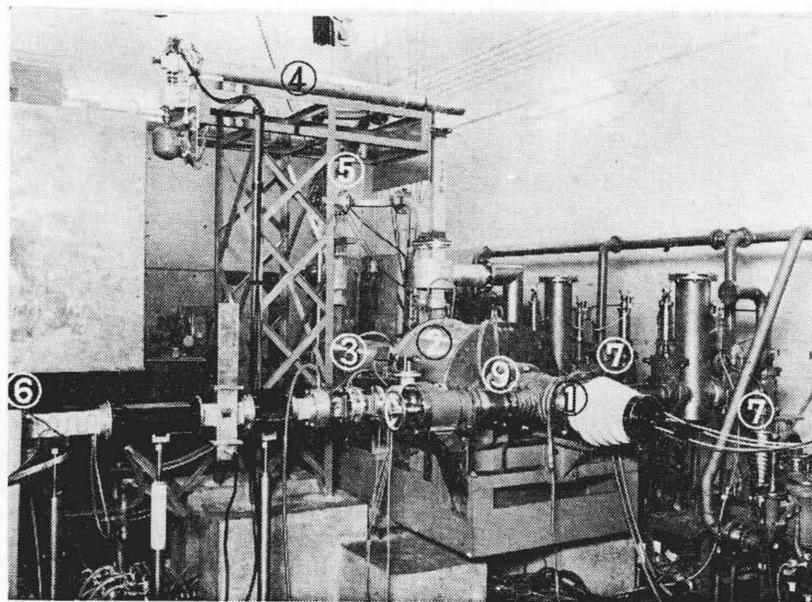
(5) 電子銃、集束コイルなどの設計が相まって非常に良好なビーム透過率を得ている。すなわち陰極から出た電子のうち、電子取出窓を通して外部に取出される電子流の割合はせん頭値で 75% , 平均値で 70% に達している。

第1表 日立製作所中央研究所リニアックの性能

	目標値	実測最大値	定常運転値
電子エネルギー	6 MeV	8.2 MeV	7~8 MeV
出力平均電子流	90 μA	110 μA	90 μA
X線強度	600 r/min at 1m	690 r/min at 1m	400 r/min at 1m



第2図 日立6 MeV線形電子加速装置のブロックダイヤグラム



- ①: 電子銃
- ②: 集群部集束コイル
- ③: 光速部集束コイル
- ④: 移相器
- ⑤: 水負荷無反射終端
- ⑥: マグネトロン QK-327
- ⑦: 真空排気系
- ⑧: 電子取出窓
- ⑨: カプラ

第3図 日立 6 MeV 線形電子加速装置

2.2 加速の設計

2.2.1 集束部加速管の設計

加速管中の近軸電子については軸垂直面内運動に無関係と仮定した場合、軸方向電子運動は次の連立方程式で与えられる⁽¹⁾。

$$\frac{d\gamma_e(\xi)}{d\xi} = -\alpha(\xi) \sin \Delta(\xi) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d\Delta(\xi)}{d\xi} = 2\pi \left(\frac{1}{\beta_w(\xi)} - \frac{1}{\beta_e(\xi)} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\gamma_e(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_e^2(\xi)}} = \frac{m}{m_0} \dots\dots\dots (3)$$

ただし ξ : 加速管軸方向の長さ/マイクロ波の自由空間波長 λ_0
(われわれの場合 $\lambda_0=10.7$ cmにとった。これは周波数では真空中 2,801.78Mc に相当する)

$\Delta(\xi)$: 電波に対する電子の位相角を radian で表わしたもので加速位相を $\Delta=0 \sim -\pi$ にとる。

$\alpha(\xi)$: 加速管内正規化電界強度 $= \frac{eE(\xi)\lambda_0}{m_0c^2}$

$E(\xi)$: 加速管内有効電界強度振幅値

$\beta_w(\xi)$: 電波の正規化位相速度 $= v_p/c$

$\beta_e(\xi)$: 電子の正規化速度 $= v_e/c$

m : 電子の全質量

m_0 : 電子の静止質量

集束部加速管設計の順序は、(1) $\alpha(\xi)$, $\beta(\xi)$ の形を決める。(2) この条件を満すように 2a, 2b, d の寸法 (第1図参照) を計算する。(3) 試験空洞の共振周波数を測定して計算値を補正する。

われわれは E. L. Chu の解析⁽⁴⁾を参考にして2種類の集束部設計を行ないこれを比較して集束部加速管長を6波長とし、 $\alpha(\xi)$, $\beta(\xi)$ を次のように決めた。

$$\alpha(\xi) = 1.1 + 0.9 \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi-3}{3} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta_w^2(\xi)}} = 1.15470 - \int_0^\xi \alpha(\xi) \sin \Delta_c(\xi) d\xi \dots\dots (5)$$

$$\Delta_c(\xi) = -\frac{\pi}{6} \left\{ 1 + \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi-3}{3} \right) \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし $0 \leq \xi \leq 6$

この設計の集束部加速管の特性を知るために、入射位相 $\Delta(0) = 0$ 度を中心に5度おきに71の初期条件について(1)~(3)式を数値的に解いて、電子の位相振動とエネルギー振動を求めた。計算はすべて日立製作所中央研究所計算機センターのHIPAC計算機によった。結果の一部を第4図および第5図に示す。この計算によってわれわれの設計による集束部加速管は、入射された電子数の97%以上がマイクロ波に乗って加速され、集束部出口でのエネルギーせん頭値 1.99 MeV, 半値幅 0.78 MeV, 集束位相せん頭値 -42.5 度, 位相幅 $-30 \sim -70$ 度であり、われわれのリニアク集束部として満足な特性をもつことがわかった。

次にわれわれは集束部加速管の周波数特性を検討した。 $\beta_w(\xi)$ を周波数の関数として示すと次式のようなになる。

$$\beta_w(\xi) = \beta_{w0}(\xi) + \Delta\beta_w(\xi) \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta\beta_w(\xi) = -\beta_{w0}^2(\xi) \times \frac{c}{v_g(\xi)} \times \frac{\Delta f(\xi)}{f} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta f(\xi) = f_0 - f_r(\xi) \dots\dots\dots (9)$$

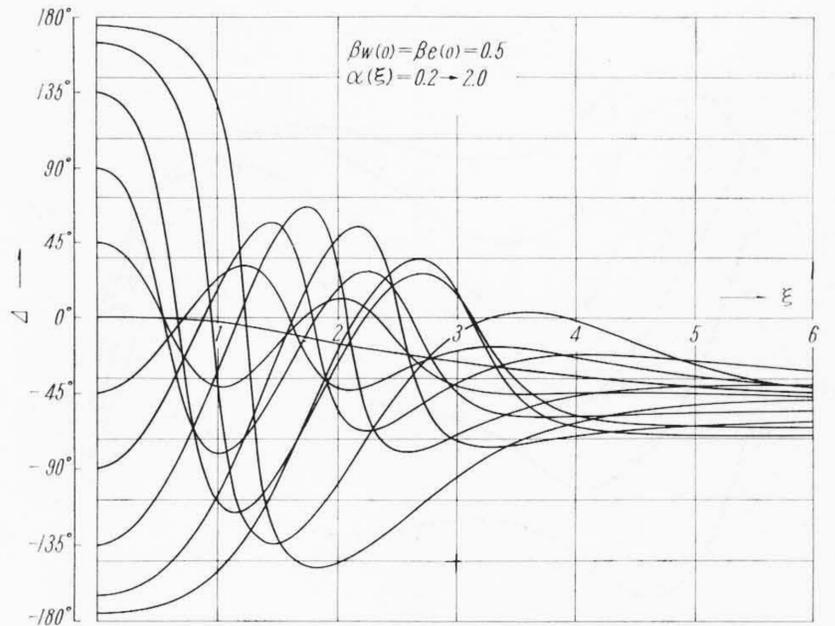
ただし f_0 : マイクロ波電源の発振周波数

$f_r(\xi)$: 加速管の $\pi/2$ モードの周波数

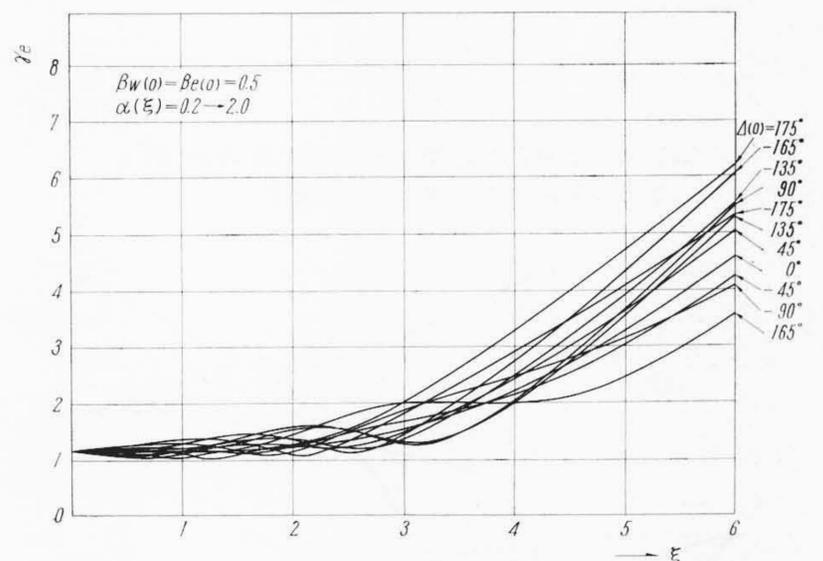
f : 加速管の設計周波数

$v_g(\xi)$: 加速管中のマイクロ波の群速度

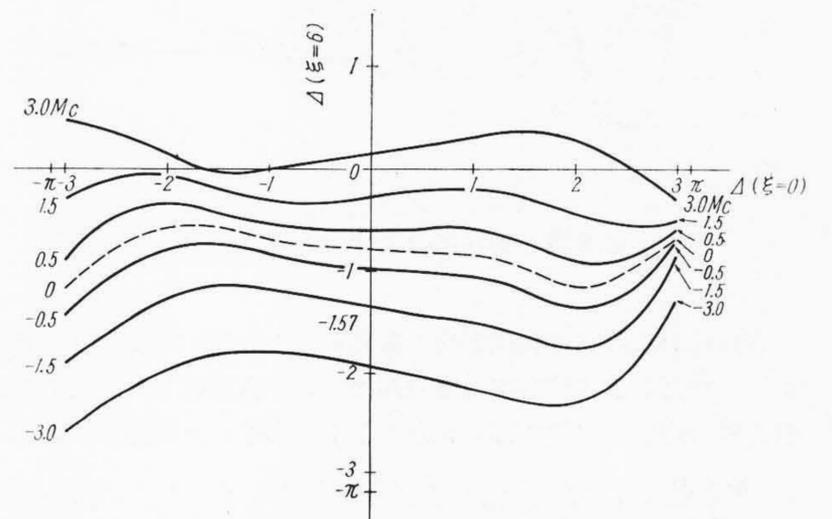
$\beta_{w0}(\xi)$: f_0 と $f_r(\xi)$ が一致している場合の $\beta_w(\xi)$



第4図 集束部加速管中での電子の位相振動



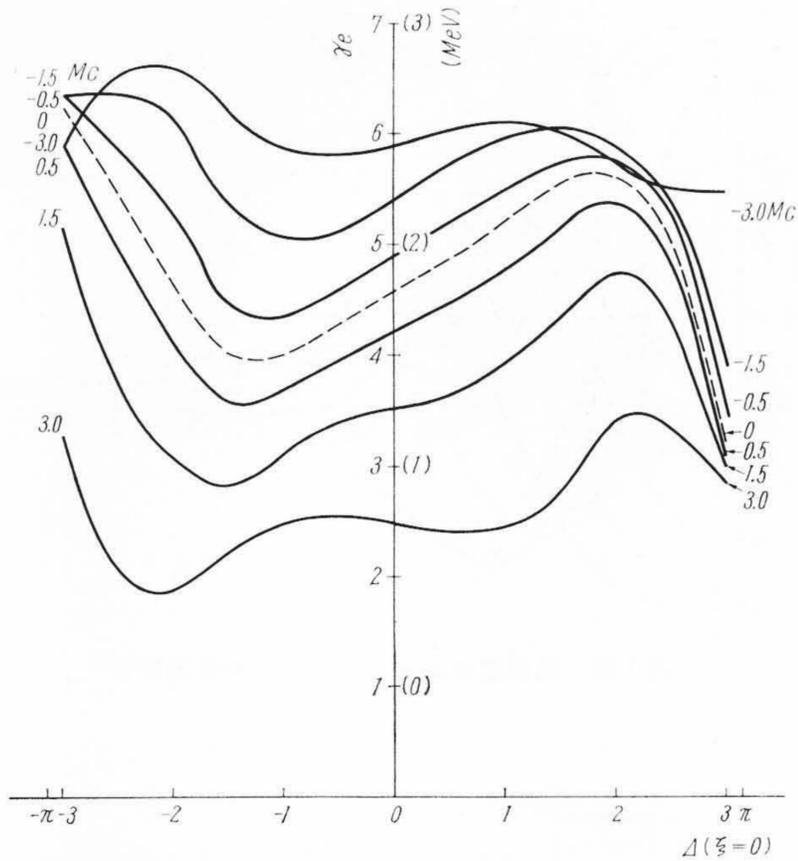
第5図 集束部加速管中での電子エネルギー振動



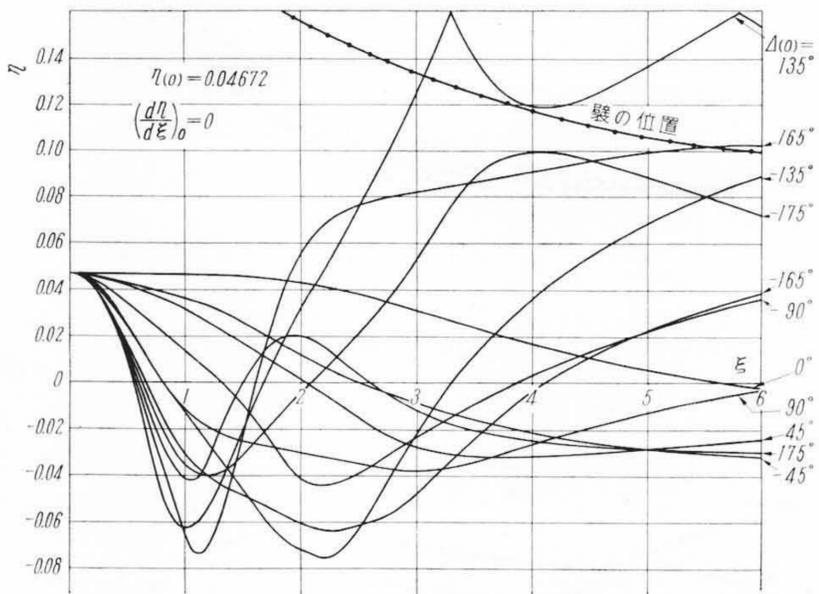
第6図 集束部加速管電子入射位相 $\Delta(\xi=0)$ と電子出口位相 $\Delta(\xi=6)$ の関係 (パラメータ Δf)

いま Δf は ξ に関して一定であるとし、 Δf をパラメータにとって(1)~(9)式を計算した集束部加速管出口での $\Delta(\xi)$ および $\gamma_e(\xi)$ の値を第6図および第7図に示す。

この結果 $f_0 < f_r$ かつ $|f_r - f_0| \leq 3.0$ Mc では集束部出口での電子エネルギーは $f_0 = f_r$ の場合より高くなり、エネルギー分布も改良されるが位相集束性は悪くなること、逆に $f_0 > f_r$ かつ $|f_r - f_0| \leq 3.0$ Mc の場合はエネルギーは低下し位相集束性も特に利点がないことがわかった。周波数が低い場合に出力エネルギーが高くなるのは、集束部加速管出口の位相集束の中心を60度を選んだため周波数を低くすると集束中心が加速電圧の高い方向に移るためである。



第7図 集群部加速管電子入射位相 $\Delta(\xi=0)$ と電子の到達エネルギー γ_e の関係



第8図 集群部加速管中の電子軌道

さらにわれわれは動径方向の振動について次式により計算した⁽⁵⁾。ただし加速管内電磁場の高次の成分は省略し、また電子速度の軸方向成分は動径方向成分より十分大きいと仮定した。

$$\frac{d^2\eta(\xi)}{d\xi^2} - \left(\frac{\alpha}{\gamma_e\beta_e^2} \sin\Delta\right) \frac{d\eta(\xi)}{d\xi} - \left\{ \frac{\pi\alpha}{\gamma_e\beta_e} \left(\frac{1}{\beta_e\beta_w} - 1\right) \cos\Delta + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\gamma_e\beta_e^2} \cdot \frac{\partial\alpha}{\partial\xi} \sin\Delta - \left(\frac{1}{\gamma_e\beta_e}\right)^2 \left(\frac{\omega_L}{\nu}\right)^2 \right\} \eta(\xi) = 0 \quad (10)$$

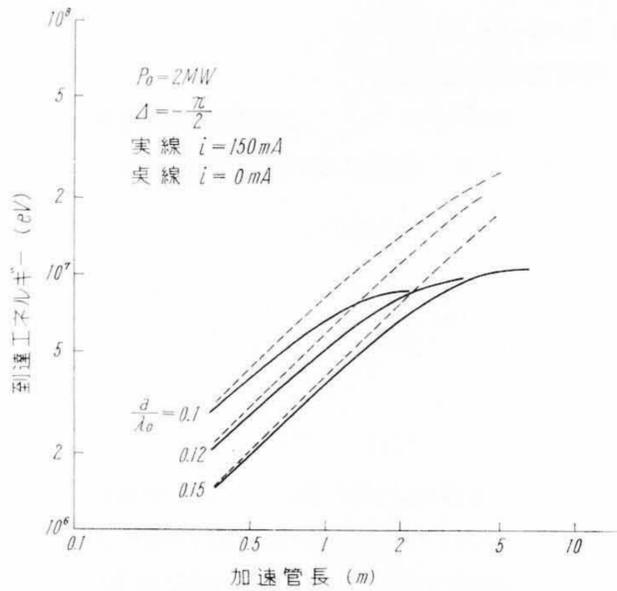
ただし $\eta(\xi) = \frac{r}{\lambda_0}$ (r : 加速管中心軸からの動径方向距離)

$$\omega_L = \frac{eB_z}{2m} \quad (\text{ラーモアの角周波数})$$

B_z : 外部直流磁界の軸方向成分(本計算では $B_z \approx 566 \times 10^{-4} \left(\alpha \frac{\sqrt{1-\beta_w^2}}{\beta_w} \cos\Delta\right)^{\frac{1}{2}} \text{Wb/m}^2$ とした)

ν : マイクロ波電源の振動数 2,801.78 Mc/s

結果の一例を第8図に示す。これは集群部加速管入口で半径0.5cmの位置で平行入射された電子の軌道を示し、「ひだの位置」が円板穴径の大きさで、したがって $\Delta(0) = 135^\circ$ および 165° の軌道は円板に当たって失われることを示している。この計算の結果



第9図 加速管長と到達エネルギーの関係

わかったことは、電子の入射が平行でないとき透過率は急激に悪くなり、平行の場合半径0.25cm以下では透過率100%、0.5cmでは91%となった。

以上の検討により(4)~(6)式の与える設計の実用性が確かめられた。

2.2.2 光速部加速管の設計⁽⁶⁾

前にも述べたように光速部加速管の構造は位相速度が光速で一定でよいから、集群部加速管のように軸方向に沿って寸法を変える必要はない。長さ L (cm) の光速部加速管中で電子がうる運動エネルギー V (volt)は次式で示される。

$$\frac{V}{L} = (p P_0)^{\frac{1}{2}} \frac{1 - e^{-IL}}{IL} - \frac{ip}{2I} \left(1 - \frac{1 - e^{-IL}}{IL}\right) \quad (11)$$

P_0 : 光速部加速管へのマイクロ波入力せん頭値(watt)

i : 加速電流せん頭値 (A)

I : 電圧減衰常数 (neper/cm)

p : reduced impedance $= 480 \left(\frac{\lambda_0}{\pi a^2}\right)^2 \sin^2\Delta$ (Ω/cm^2)

いま $P_0 = 2 \text{ MW}$, $i = 150 \text{ mA}$, $\Delta = -\frac{\pi}{2}$ と仮定し、円板の穴半径 a と設計自由空間波長 λ_0 の比 a/λ_0 をパラメータとして計算した加速管長と光速部加速エネルギーの関係を第9図に示す。図中点線は加速電流 $i \rightarrow 0$ の場合を示す。ここに a/λ_0 と加速管内電界強度 E (volt/cm)との間には

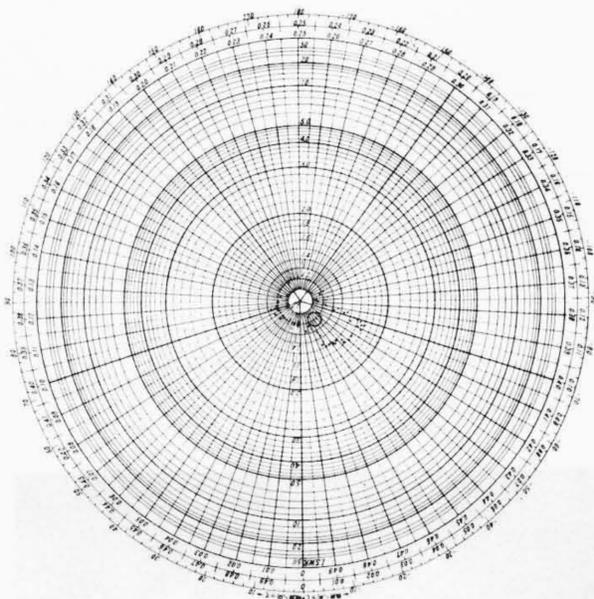
$$E = (480 P_0)^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda_0}{\pi a^2} \quad (12)$$

なる関係があり、当然同一加速管長に対して a/λ_0 が小さいほうが到達エネルギーは高くなる。一方マイクロ波源の周波数安定度と加速管内でのマイクロ波と電子の位相 shift の関係は、 a/λ_0 が小さくなるほど位相 shift への影響が大きくなる。これらの点を考慮してわれわれの光速部加速管の設計は $a/\lambda_0 \approx 0.12$ とした。

3. 主要構成部品

3.1 加速管部

加速管円板、円筒はすべて真空溶解法による無酸素銅を使用し、恒温室中で精密高速旋盤による精密加工を行ない、加工後恒温室中での測定により円板の穴径 $2a$, 厚み ηd , 円筒の内径 $2b$, 長さ $(1-\eta)d$ はすべて $\pm 5 \mu$ 以下の寸法公差にはいっていることを確認した。また表面あらさは加速管の壁損失に影響するので、ダイヤモンド・バイトにより特に注意して加工した結果、顕微干涉計による測定で $0.3 \sim 0.6 \mu$ の精密表面切削に成功した。薄金めっきを施した円板、円筒は特殊治具によって砲金製外筒中に交互にそう入され、高周波的に十分密着するように両端で締め付けられる。この構造に



第10図 光速加速管部カップラ整合度測定

よれば機械的強度は外筒がもち、真空はO-リングによって保たれているが電鍍法による加速管製法より簡単であり、また電鍍後に加速管の外表面仕上げをするような必要がないため加速管の心出しも容易にできる。

2a, 2bの寸法は理論式から計算した値を、加速管の一部を共振空洞に置き換えてその共振周波数を測定する、いわゆる空洞測定で実験的に補正したが、特に集群部は前にも述べたように各部の寸法が異なるため全数の空洞測定を行なって補正した。完成した光速部加速管の $\pi/2$ モード共振周波数の設計周波数とのずれは200 kc以下であり、さらにモード試験によって各空洞ごとの「ばらつき」を調べたが、互いに隣り合う空洞の中心間位相差の標準偏差は0.014radianであった。また次に述べるカップラと組み合わせた加速管全体をアイソレータの前から見た場合、2,798~2,804 Mcの間でVSWRは1.1以下、減衰量は5.6 dB以下であった。

3.2 カプラ部

カップラは第2図でもわかるように加速管へのマイクロ波の出入口であり、マイクロ波的には矩形導波管中の TE_{10} モードと加速管中の TM_{01} モードを結合するモード変換器であり、同時にわれわれのリニアクでは機械的に加速管、立体回路などをささえる役目をしており、集群部入口、出口および光速部用と3種類のカプラが使われている。各カップラは加速管と組み合わせてresistive plunger法によって整合度を測定し、その寸法を決定した。光速加速管部のカップラの測定例を第10図に示す。

3.3 電子銃およびその電源

電子銃はピラス形電子銃で陰極にはシンター陰極を用いた。電子銃の加速装置への組み込みには特に平行入射になるよう十分注意して行なった。加速実験を行なうまえに、加速管の代わりに内径20.5φの銅パイプ（長さは加速管長に等しい）を用いて透過率の測定を行なったが、陰極から出た電子の90%以上が電子取出窓の位置に達した。電子銃の動作特性の一例を第2表に示す。

第2陽極直流高圧電源は出力電圧0~100kV、平均電流容量1.5mA、せん頭電流容量500mA、電圧降下1%以下のもので、これに電子銃ヒータ電源、ウェーネルトおよび第1陽極用バイアス電源が組み込まれている。

第1陽極用変調器の特性は第3表に示すようなものである。パルス成形素子にはRG58U同軸ケーブルを用いている。

3.4 マグネトロン用電源

Raytheon社製周波数可変大電力マグネトロンQK-327を動作させるための電源は直流電源および変調器から成る。直流電源は出力電圧4~15kV間連続可変、最大出力電流2.2Aで整流管5H693本とサイラトロン5G693本による全波整流回路が用いられ、電圧

第2表 電子銃動作特性例

電子流せん頭値	200mA	第1陽極電圧	6kV
有効パルス幅	2 μ s	第2陽極電圧	80kV
繰返し周波数	360pps	ヒータ入力	47W

第3表 電子銃第1陽極用変調器の性能

パルス電圧せん頭値	0~8kV	パルス電圧立上り	0.2 μ s以下
パルス・トランス耐圧	DC 90kV以上	パルス電圧立下り	0.4 μ s以下
パルス幅	1~2 μ s (0.2 μ sごと切替)	サグおよびパルス振動分	20%以下
繰返し周波数	36~500pps		

が可変であると同時に電圧の安定化が計られている。出力電圧リップル0.5% p-p以下、電源電圧 $\pm 10\%$ の変動に対し出力電圧変動 $\pm 1\%$ 以下で安定に動作している。変調器出力サイラトロン（水素入り）として5948を用い、実験用には1257も接続できるようになっている。パルス出力電圧最高71kV、最大出力電流130A、パルス幅2 μ s、くり返周波数20~500ppsである。

3.5 立体回路部

大電力立体回路部品として開発したおもなものは、(1)水負荷無反射終端（せん頭電力5MW、平均4kWまで試験して使えることを確認した）、(2)円偏波移相器（同じくせん頭5MW、平均4kWまで試験した。現在真空で使用しており、制御盤からの遠隔操作によって0~360°の位相制御が行なえる）、(3)方向性結合器、(4)真空抜導波管（VSWR 1.02以下）、(5)気密セラミック窓などである。

3.6 真空排気系

加速管およびセラミック窓までの導波管は3台の油拡散ポンプ（液体窒素冷却トラップ付）によって 10^{-6} ~ 10^{-7} mmHg台の真空を得ているが、一方マグネトロン~セラミック窓間、水負荷無反射終端~セラミック窓間の立体回路部は、4気圧程度の乾燥圧縮空気によって大電力マイクロ波の強電界による放電を防止している。真空バルブは圧縮空気で作動し、バルブの開閉、スイッチの開閉はすべて自動的に行なわれる。断水および真空度悪化に対しても装置は自動的に働き、連日無人終夜運転を行なっている。

3.7 集束コイルおよびその電源

集群部および光速部加速管の外側には、電子流集束のためのコイルが装備されている。集束コイルは電気的には集群部は6分割、光速部は5分割されており、それぞれ調整用抵抗器によって電流を調節して出力ビーム最適条件を求めることができる。またコイルは機械的には集群部、光速部がそれぞれ一つのボビンに巻かれており、加速管に対して前後、上下、左右に各 ± 5 mm程度可動で位置の調節ができる。磁場の強さは集群部で最大1,000ガウス、光速部で最大150ガウスであり、全コイル電流は $\pm 1\%$ 以下の安定度に押えられている。

3.8 その他付属品

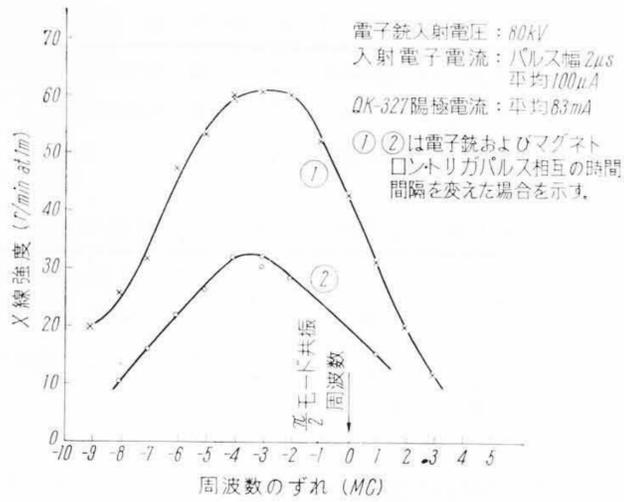
電子流取出窓は100 μ 厚のAlハクを水冷して用いており、事故はほとんど起こっていない。電子エネルギー測定用の分析電磁石は60度偏向形で、Cs¹³⁷の0.661 MeVのConversion lineを用いて校正した。

4. 出力ビームの測定

4.1 集群部加速実験

全装置の総合加速実験を行なうに先だて、われわれはさきにも述べたように、まず加速管の代わりに銅パイプを置いて電子銃の陰極から出た電子が十分良好な透過率で加速管出口の位置に達することを確かめ、次に集群部加速管のみを取り付けて加速実験を行なった。

実験はAlの電子取出窓の直後に1mm厚のタングステン板を置



第 11 図 QK-327 発振周波数と X 線強度の関係 (集群部加速実験)

き、このターゲットから発生する制動放射 X 線強度を出力の「めやす」とし次の実験測定を行なった。(1) マイクロ波周波数と出力ビームの関係、(2) マイクロ波パルスと入射電子パルスの時刻の「ずれ」による出力の変化、(3) マイクロ波電力と出力ビームの関係、(4) beam loading の影響。

このうち(1)の周波数と出力ビームの関係の測定結果を第 11 図に示す。なお周波数の測定は以下述べる実験ですべて周波数分析器のピークの値で読んだ。図からわかるように集群部加速管の $\pi/2$ モード共振周波数より 3 Mc くらい低い周波数で X 線強度は最大を示している。これは 2.2.1 で述べた計算結果とよく一致している。またわれわれの装置はマグネトロン駆動パルスと電子銃駆動パルスの時間間隔を $\pm 2 \mu s$ の範囲で連続的に変えられるようになっているが、電子銃駆動パルスの遅れを変えることによって図に示すように出力 X 線強度が大幅に変わることがわかる。

われわれはまた重水の (γ, n) 反応の「しきい値」が 2.23 MeV であることを利用し、X 線ターゲットの直後にパラフィンで囲った重水を置き、発生する中性子を近傍に置いた Ag 板の活性化を測定することによって確認して、集群部加速管が十分設計性能に達していることを確かめた。

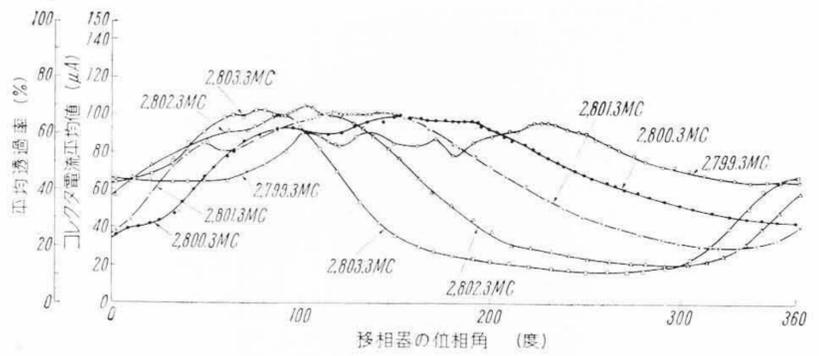
4.2 総合加速実験

以上述べた設計、検討、予備実験、製作を経て昭和 36 年 4 月、全装置の組み立て・調整を終え総合加速実験にはいり以後順調に所期のビームの発生を見た。

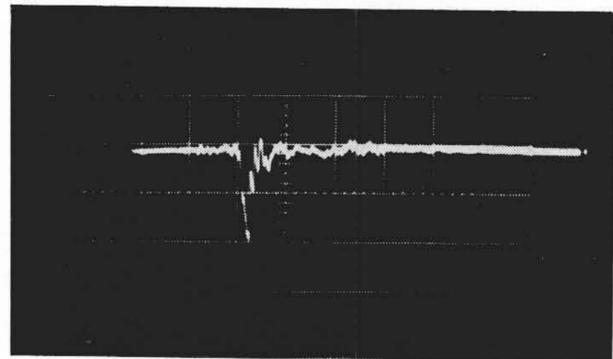
4.2.1 電子線透過率の測定

電子取出窓の直後に電子流コレクタを置き、マグネトロン発振周波数を 2,799.3 Mc から 2,803.3 Mc まで 1 Mc おきに変え、各周波数での移相器位相角と電子線透過率 (コレクタに達する電流値と陰極から発生する電流値との比) の関係を測定した。第 12 図はこの結果を示す。図から最大平均透過率は 60~70% 程度で設計周波数をはさむ 4 Mc の範囲にわたってあまり変わらないことがわかる。

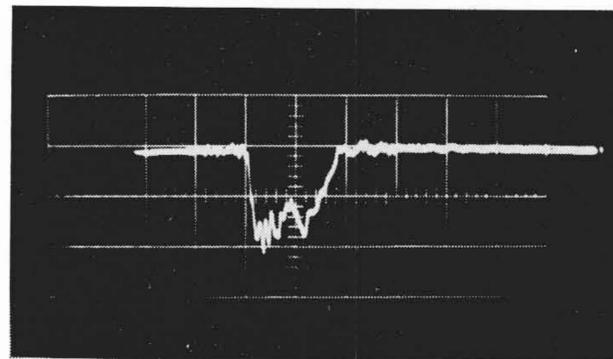
また移相器位相角とコレクタ電流波形の関係は第 13 図のとおりである。このときの実験条件は周波数 2,801.8 Mc、入射平均電流 $150 \mu A$ 、パルス幅 $2 \mu s$ 、くり返し 360 pps、電子流コレクタと大地間に接続した 50Ω 抵抗の両端の電圧をシンクロスコープで観測したものである。(a) は光速部加速管が反対位相にあって電子を減速している場合であり、図のピークは光速部加速管の電場生成時間に相当する時間幅の間だけ電子が減速を受けることなくコレクタに達したものであると思われる。なお、このピークの時間幅は雑音を拾っているため正確には測定できなかったが $0.2 \sim 0.3 \mu s$ であり、また光速部加速管の電場生成時間の計算値は $0.19 \mu s$ である。(c) は最大平均透過率を与える移相器の位相角での波形を示す。



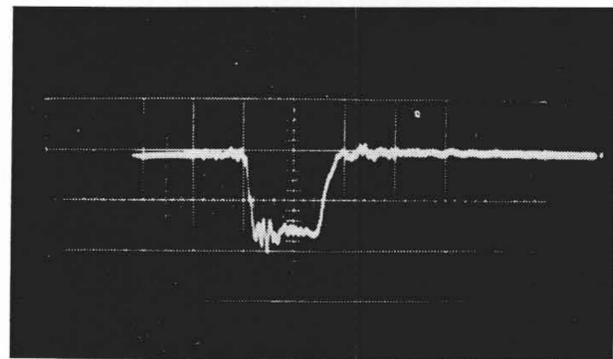
第 12 図 移相器の位相角と透過率の関係



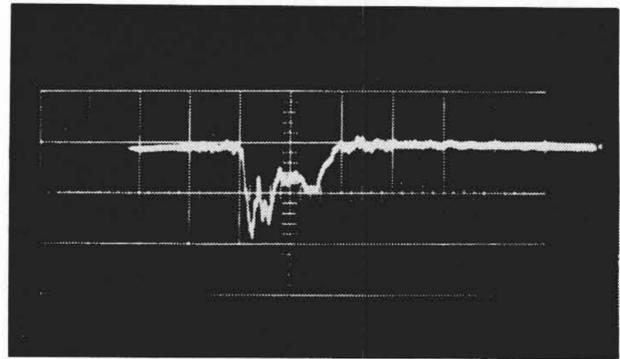
(a) $\delta = 302^\circ$



(b) $\delta = 80^\circ$



(c) $\delta = 140^\circ$



(d) $\delta = 200^\circ$

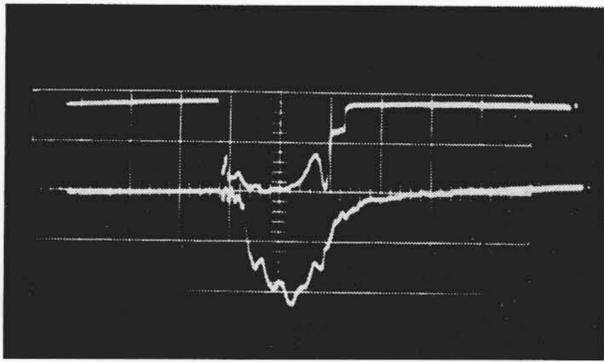
$f = 2,801.8 \text{ Mc}$, 入射平均電流 $150 \mu A$, パルス幅 $2 \mu s$, $\delta =$ 移相器の位相角
縦軸 100 mA/div. , 横軸 $1 \mu s/\text{div.}$

第 13 図 移相器の位相角と出力電流波形

この場合のパルス幅は波高半値幅で $1.6 \mu s$ であり、 $2 \mu s$ の入射幅 (マイクロ波パルス幅と同一) に対し集群部の電場生成時間 $0.11 \mu s$ (計算値) と上記光速部の生成時間を差し引いたものに等しい。

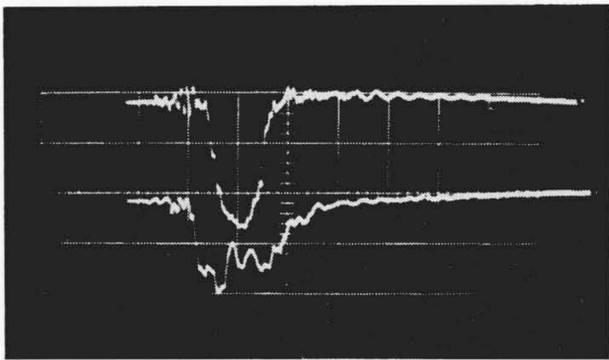
第 14 図は加速管入口と加速管出口でのマイクロ検波波形を示すが、この時間遅れも上記の値にほぼ等しい。

入射電子流のパルス幅を $1 \mu s$ にしてマイクロ波形の中央にもってきた場合の波形を第 15 図に示す。マイクロ波形の中央部に



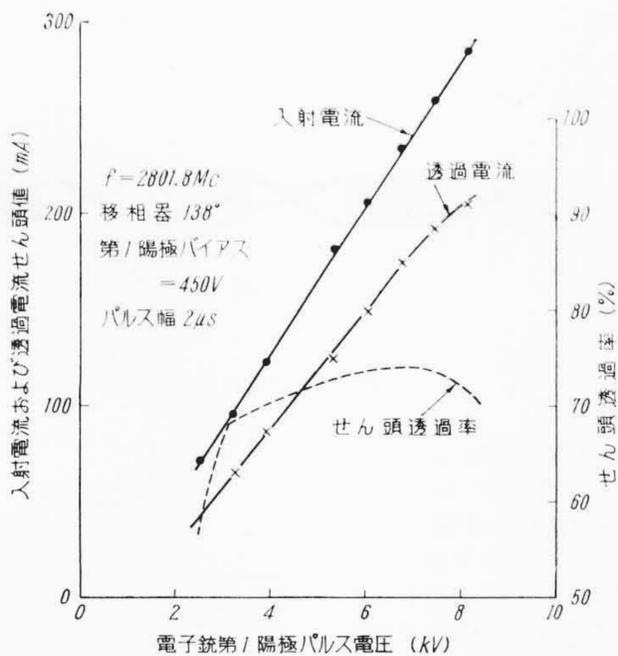
入射電流 0 μA, 横軸 1 μs/div.

第14図 加速管入口(上)と加速管出口(下)でのマイクロ検波波形



$f=2,801.8\text{ Mc}$, $\delta=138^\circ$, 入射平均電流 115 μA, パルス幅 1 μs
電流波形: 縦軸 100 mA/div., 1 μs/div.
検波波形: 横軸 1 μs/div.

第15図 出力電流波形(上)と加速管出口側マイクロ検波波形(下)



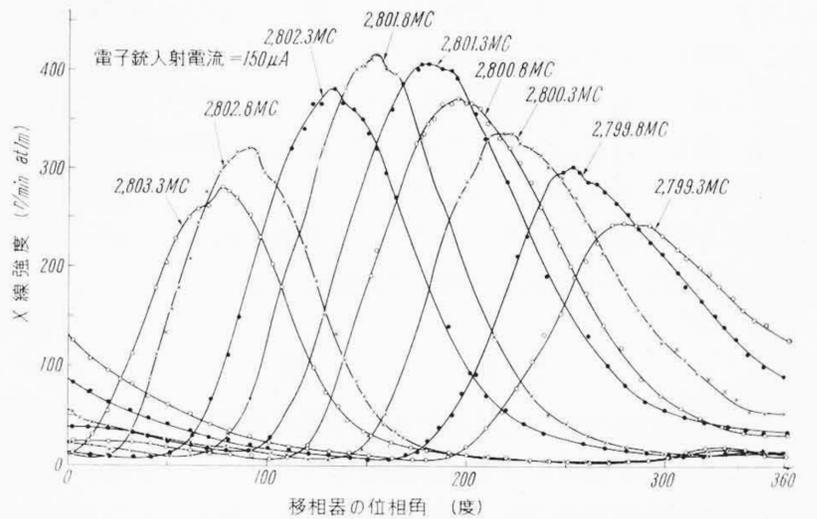
第16図 透過率の測定(パルス幅 2 μs の場合)

beam loading の影響が見られる。

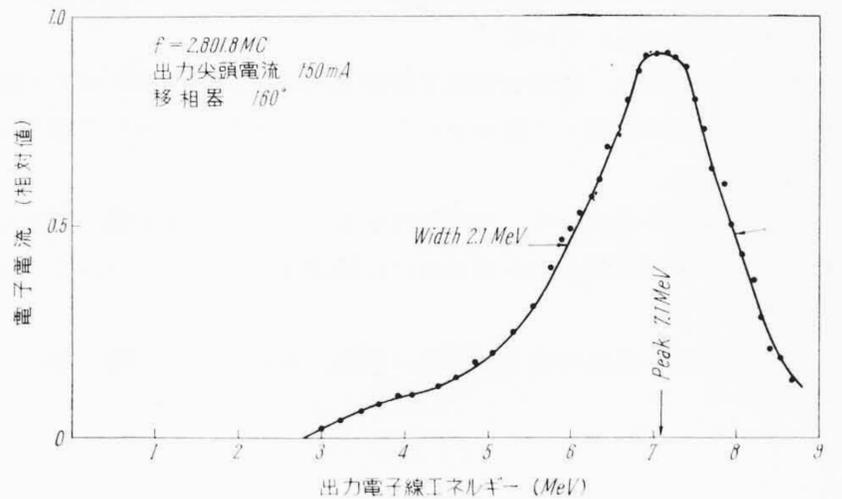
われわれの電子銃はまえにも述べたように、第1陽極にかかるパルス電圧を変えることによって簡単に入射電流を変えることができる。入射電流を変えた場合のせん頭透過率は第16図の点線のように最大75%に達する。

4.2.2 移相器位相角と出力X線強度の関係

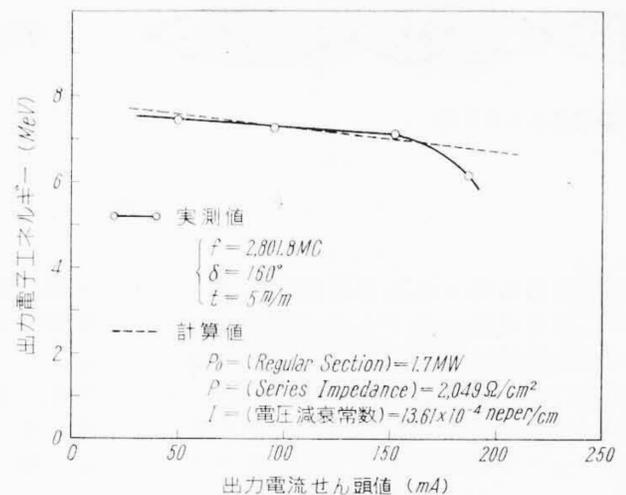
電子取出窓の直後にX線発生用タングステン・ターゲット(タングステン3mm厚+銅2mm厚)を置き、1m離れた位置に電離槽を置いてX線強度を測定した。実測した移相器位相角とX線強度の関係を第17図に示す。設計周波数2,801.8Mc付近でX線強度は最大になっている。この図を書き直して移相器位相角を一定に保って周波数を変えた場合のX線強度変化の様を描いてみると、X線強度が半分になる周波数幅は1.5~1.7Mcであるが、各周波数に対してX線強度最大になるように移相器を調節することによってX線強度半値幅は上記の値の数倍になり、かなり広い周波数範囲にわたって一定量のX線を発生できることがわかり、



第17図 移相器の位相角とX線強度の関係



第18図 エネルギースペクトル



第19図 ビーム・ローディングの特性

移相器をそう入した効果が認められる。

4.2.3 出力電子線のエネルギー・スペクトル

3.8に述べた分析電磁石を用いて出力電子線のエネルギー・スペクトルを測定した。電子取出窓を出た出力電子流は空气中を約2cm通ってふたたびAl窓を通して分析用真空槽にはいり、偏向、分析され5mm幅のスリットを通過してからファラデー・ケージで測定される。スペクトル測定にあたっては毎回磁石を消磁してから行なう必要がある。測定結果の一例を第18図に示す。半値幅は約2.1MeVで計算値よりも広い。

4.2.4 beam loading 特性

リアクの加速電流が増加すればビーム負荷損失が増加して加速管内の電界強度は下がり、したがって出力エネルギーは減少する。(11)式によってわれわれの光速部加速管についてこの減少の割合を計算すると $5.6 \times 10^{-3} \text{ MeV/mA}$ になる。また集群部加速管についての値はHIPAC計算機による位相およびエネルギー振動の計算結果から、 $2.3 \sim 3.1 \times 10^{-4} \text{ MeV/mA}$ と1けた以上小さいこ

とがわかった。この値を実験結果と比較したものが第19図である。実測値のエネルギーはエネルギー・スペクトルのピークに相当する値である。両者を比較してエネルギーのレベル、傾斜とも大体一致していることがわかる。せん頭電流 190 mA 付近で急激にエネルギーが下がっているのは、いわゆる beam shortening effect と呼ばれる現象のためで、この現象が起こるとビームは不安定になってスペクトルの測定は困難になる。

5. 結 言

以上われわれが主として工業などへの応用を目的として、特にマイクロ波電源部を簡単にするため大電力マグネトロンを用いて試作した線形電子加速器の設計、電子振動の計算、構成部品の製作、出力ビームの測定結果について述べた。実測の結果、当初の目標定格を上回るビーム出力が確認され、現在日立製作所中央研究所において安定に動作運転している。

本試作にあたり、東京大学原子核研究所熊谷教授ほかリニア関係のかたがたには種々ご教示をいただいた。本報告をかりて厚くお礼申しあげる。

また昭和電子株式会社、日立製作所日立工場、戸塚工場、亀有工場、茂原工場の関係者のかたがたには構成部品の製作についてご協力いただいた。

日立製作所中央研究所星合所長、浜田、只野副所長、関、明山、

神原部長、高田前部長、斉藤主任研究員には終始ご指導をいただいた。また所内第3部、第5部、第6部、第7部、第8部の関係者のかたがたにはそれぞれ設計、製作、試験、計算などを担当していただいた。以上のかたがたに対し深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) M. Chodorow et al.: Rev. Sci. Instr., 26, 134 (Feb. 1955)
- (2) T. Nishikawa et al.: J. Phys. Soc. Japan, 16, 1817 (Oct. 1961)
- J. Tanaka: J. Phys. Soc. Japan, 16, 2081 (Nov. 1961)
- A. Miyahara: J. Phys. Soc. Japan, 16, 2567 (Dec. 1961)
- (3) 沢田, ほか: 応物誌 28, 402 (昭34-7)
- 前川, ほか: 物理学会 16 回年会予稿 1, 114, 12p-N-7 (昭36-10)
- 黒田, ほか: 物理学会 16 回年会予稿 1, 115, 12p-N-8 (昭36-10)
- 武田, ほか: 物理学会 16 回年会予稿 1, 116, 12p-N-9 (昭36-10)
- 木村, ほか: 物理学会 16 回年会予稿 1, 117, 12p-N-10 (昭36-10)
- 沢田, ほか: 電通学会昭36年度全国大会予稿 101, 101 (昭36-11)
- (4) E. L. Chu: ML-140 (May 1951)
- (5) E. S. Smärs: AECU-2995 (Dec. 1954)
- (6) C. F. Bareford and M. G. Kelliher: Philips Tech. Rev. 15, 1 (July 1953)



特許第258400号

特 許 の 紹 介



松本政吉・吉柳清美

原 子 炉

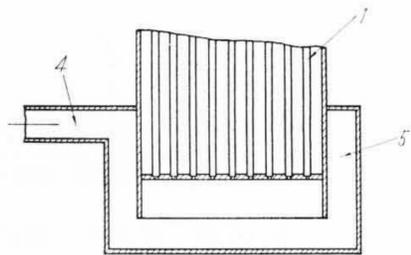
従来炉心部底面に導入される冷却媒体は、直接に各燃料層に送られるため中心部の外筒に通ずる冷却媒体の流速が外周部におけるより大となり冷却効果に不均等分布を生ずる傾向がある。

この発明は、炉心部底面に冷却媒体を導入するに当り、水平旋回運動を与え、渦を画きながら外周から中心部に向う流れをつくり、炉心部底面における冷却媒体の上向き成分をほぼ一定に保ち、均等な流れをうるものである。

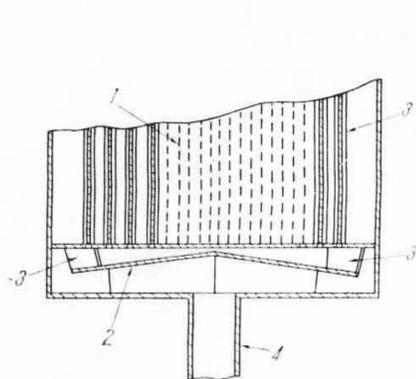
したがって、本発明によると第1~3図に示すように、導管4により導かれた冷却媒体はいったん外周部に導かれたのち、傘形仕切板2の外周上面において直立仕切板3により旋回運動を生ぜしめられ

傘形仕切板2の上面に沿って渦を画きつつ中心部に向かう構成、あるいは第4~5図に示すように、炉心部1の下部において、外周に冷却媒体通路5を形成してこの通路に接線方向から冷却媒体を導入し旋回運動を与えてのち、中央部に導くような構成が行なわれる。

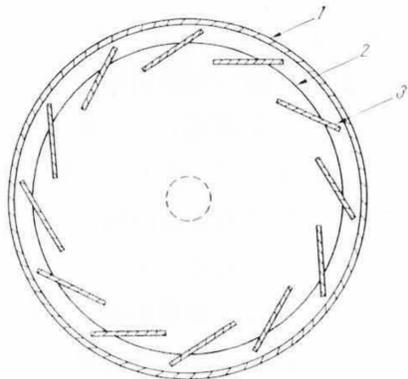
(丸山)



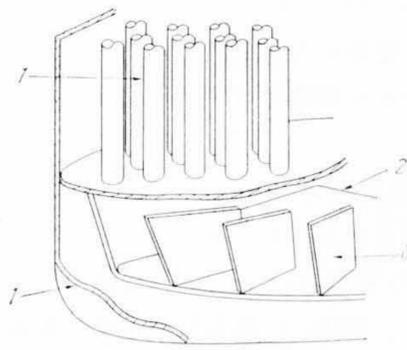
第4図



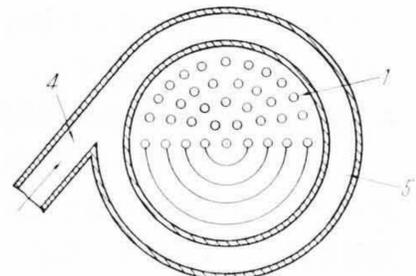
第1図



第2図



第3図



第5図