

PLA - 90 - 45

90 / 9 / 14

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) LEBT 用の新しいチョッパーの提案

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

概要 (ABSTRACT)

既に、高周波空洞 (432 MHz) を利用するチョッパーを提案して、その低電力空洞テスト及び高電力パルス増幅器のテスト結果を報告している。ここでは、空洞内の電磁場の立ち上がり立ち下がり間は、ビームが十分に偏向させられる可能性がある。新たに提案するチョッパーは、原理的には、横方向のビームの振れを相殺する方式なので、過渡状態の問題は、単にビーム電流がここでは小さいというだけである。しかも CW の高周波 (3 MHz) を利用するので、製作運転の点からも望ましい。問題は難しいと言われている RFQ への入射ビームラインと共存する形で製作ができるかどうか、そして、H⁻ ビームの性質は維持出来るかどうかにかかっていると思われる。ここでは、エミッタンスを持つビームについて、新しいチョッパーの振る舞いを計算してみた。

KEY WORDS:

Ion source, RFQ, DTL, CCL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics,
Transport, Vacuum, Cooling
Klystron, Low level rf, High power rf, Modulator
Control, Operation, Radiation, Others

LEBT 用の新しいチョッパーの提案

900914 加藤隆夫

序

既に、高周波空洞（432 MHz）を利用するチョッパーを提案して、その低電力空洞テスト及び高電力パルス増幅器のテスト結果を報告している（文献1）。そこでは、空洞内の電磁場の立ち上がり立ち下がり間には、ビームが不十分に偏向させられるので、リニアックの下流において、横方向のエミッタンスの増大からビーム損失を招く可能性がある。

ここで提案するチョッパーは、原理的には、横方向のビームの振れを相殺する方式なので、過渡状態の問題は、単にビーム電流がそこでは小さいというだけである。しかも CW の高周波（3 MHz）を利用するので、製作運転の点からも望ましい。問題は、難しいと言われている RFQ への入射ビームラインと共存する形で製作ができるかどうか、そして、H ビームの性質は維持出来るかどうかにかかっていると思われる。ここでは、エミッタンスを持つビームについて、新しいチョッパーの振る舞いを計算してみた。但し、計算課程においては、空間電荷効果ははいっていない。

チョッパーの原理（文献2）

Z 方向の一様磁場内において、粒子がサイクロトロン運動をしているとする。X 方向にサイクロトロン運動の周期と同じ高周波電場を加えると、これは、強制振動の共鳴状態と同じ事になり、サイクロトロン運動の半径は無限に増加する。ある程度半径が増加した所にスリットを置いて、粒子を選択する。次に、高周波電場の位相を変化させると、サイクロトロン運動の半径が減少するようにできる。ある経過時間の後で、粒子はほぼ元の位置に戻る。この課程で、粒子の受ける高周波電場の初期位相（ 2π ）が、スリットの位置に置ける X-Y 平面上の一定半径の円周（ 2π ）に対応している点が巧妙である。

チョッパーの構成（図1）

- 1) ビーム方向にソレノイド磁場 B_z を加える。
- 2) X 方向に2枚の電極（偏向板）を置いて、高周波電場 E_x をかける。高周波の振動数はサイクロトロン運動の周期と同じにする。電場の強さにより、スリットの位置に置ける X-Y 平面上の円の半径をコントロール出来る。
電極の長さ L_1 は、粒子が高周波の1周期に進む距離とする（この整数倍でもよい）。
- 3) 長さ $L_2=L/2$ のドリフトスペースを置く。ソレノイド磁場 B_z は存在する。
- 4) ドリフトスペースの中心に適当なスリットを置く。
- 5) 長さ L_1 の電極を置いて、高周波電場 E_x をかける。電場の強さと位相は第一の偏向板と同じとする。

具体例

高周波電場の周波数はリングに合わせて 3 MHz とする。

1) ソレノイド磁場

$$\begin{aligned}\text{サイクロトロン周波数 } \omega &= 2\pi f = eB/m = c^*c*B/(m^*c*c/e) \\ f &= 3 \text{ MHz}, B=0.197 \text{ T} = 1.97 \text{ kgauss} \\ W_0 &= m^*c*c/e = 938.3E6\end{aligned}$$

粒子は常にサイクロトロン運動をしている。

周期は粒子のエネルギーによらない。

サイクロトロン運動の周期と高周波電場の周期が一致している。

サイクロトロン運動の半径

$$mvv/r = evB \text{ より } r = mv/(eB)$$

ここの速度は、横方向速度

2) 偏向板内部の運動 (付録参照)

$$\text{粒子速度 } \beta = (1 - (W_0/(W_0+T))^2)$$

$$\text{偏向板の長さ } L = N^*c*\beta/f, N=1$$

高周波電場 $V \sin(\omega t + \phi)$ x 方向 (上向き) へかける

図 2 に初期位相が、-90,0,90 度の場合について、X-Y 平面上の軌跡を示す。時間は同一ではないので、Z 軸からみた透視図を見ている事になる。図 3 に初期位相が、-90,0,90 度の場合について、X-Z 平面上の軌跡を示す。

設計例

ビーム 50 keV proton, $\varepsilon = 1.5 \text{ } \pi\text{mm.mrad}$

ビーム半径 13 mm と仮定する

ソレノイド磁場 1.97 kgauss

高周波電場 40000 V/m

電極長さ L1 1.032 m

ドリフトスペース長さ 0.516 m

全長 2.5XL1 2.58 m

スリット形状 扇型 240 deg

2700 粒子による計算結果を図 4、5 に示す。

図 4 は、スリット位置におけるビームの分布。

図 5 は、チョッパーとしての働きを透過率でしめした。

まとめ

長さが長すぎる点を除くと、なかなか面白い方式と思われる。全てのビームが振られるのは、多少気になるが、逆に長所となる事もあり、更に、その振れを相殺すると

いう点に魅力があり、これは過渡状態を余り気にしなくて良い事を意味しているので有り難い。

参考文献

- 1) T.Kato, "Proposal of RF Beam Chopper", PLA-89-7,
 "New Design of an rf Beam Chopper", PLA-89-17,
 "チョッパー用 10 kW 固体増幅器のパルステスト", PLA-90-42.
 "New Design of an rf Beam Chopper", 7th Symp. on Accelerator Science and
 Technology, 228 (1989).
- 2) 調査中

付録 荷電粒子の運動

静磁場 z 方向

高周波電場 x 方向

$$m\dot{\mathbf{r}} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$m\ddot{x} = e(E_x + v_y B_z)$$

$$m\ddot{y} = -e v_x B_z$$

サイクロトロン周波数 $\omega = \frac{eB}{m}$

高周波電場 $E_x = E \sin(\omega t + \phi)$

これらより

$$\ddot{x} + \omega^2 x = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$\ddot{y} + \omega^2 y = A \cos(\omega t + \phi)$$

$$A = eE/m$$

上式は強制振動を表し、周波数が同じなので、共鳴状態を表す。

一般解は

$$x = A \cos \omega t + B \sin \omega t - \frac{eE}{2m\omega} t \cos(\omega t + \phi)$$

$$y = C \cos \omega t + D \sin \omega t + \frac{eE}{2m\omega} t \sin(\omega t + \phi)$$

t=0 にて、x=0、dx/dt=0 とすれば

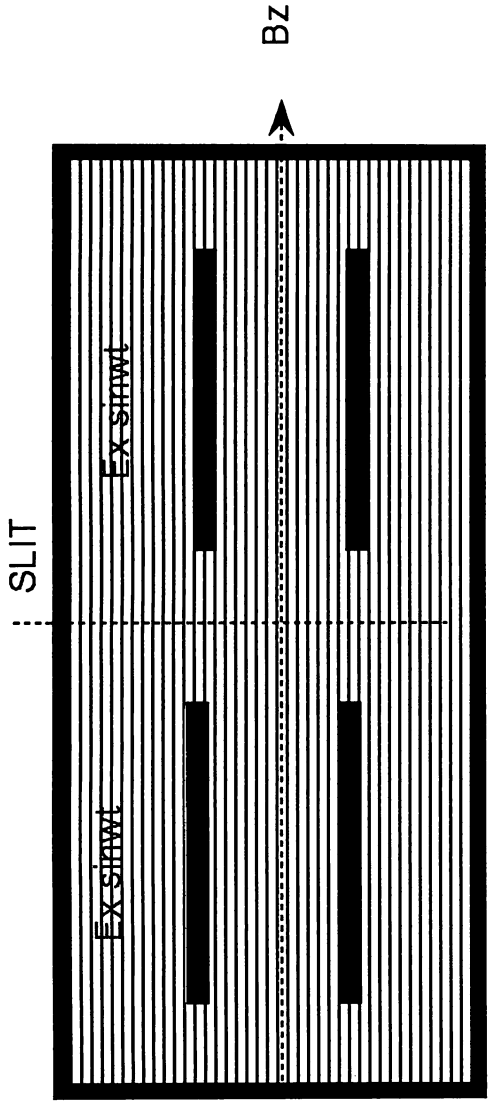
$$x = \frac{A}{2} (\cos \phi \sin \omega t - \omega t \cos(\omega t + \phi))$$

$\phi = 0$ の時

$$x = \frac{A}{2} (\sin \omega t - \omega t \cos \omega t)$$

$\phi = \pi/2$ の時

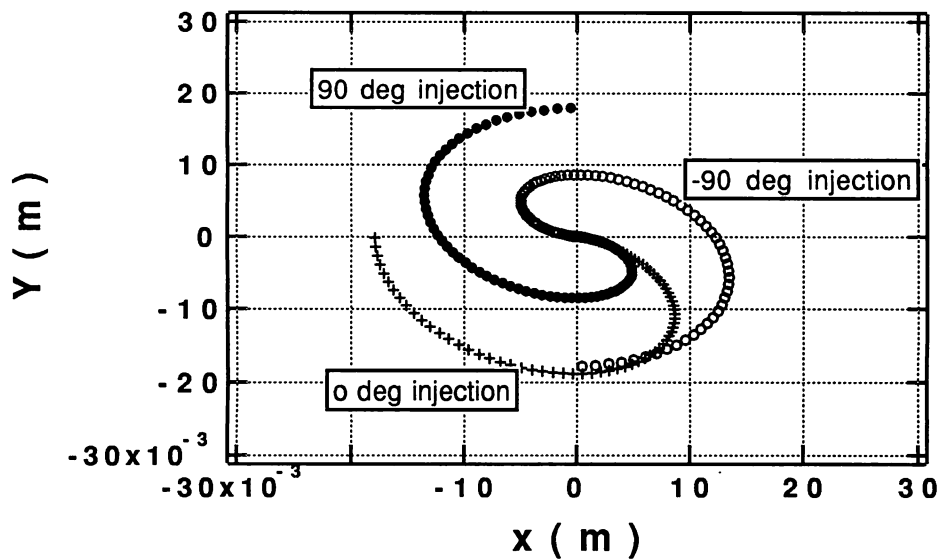
$$x = \frac{A}{2} t \sin \omega t$$



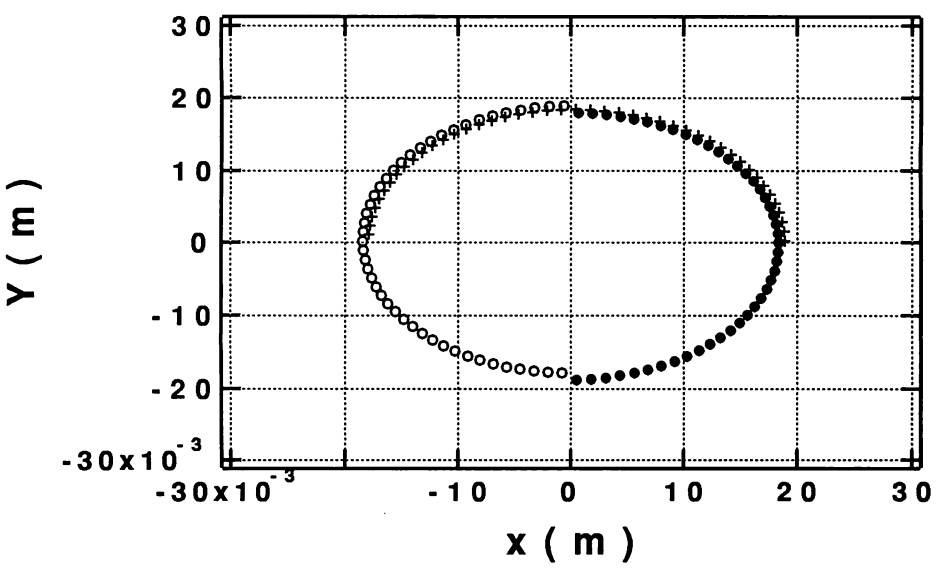
Solenoid

Fig.1 Structure of rf chopper.

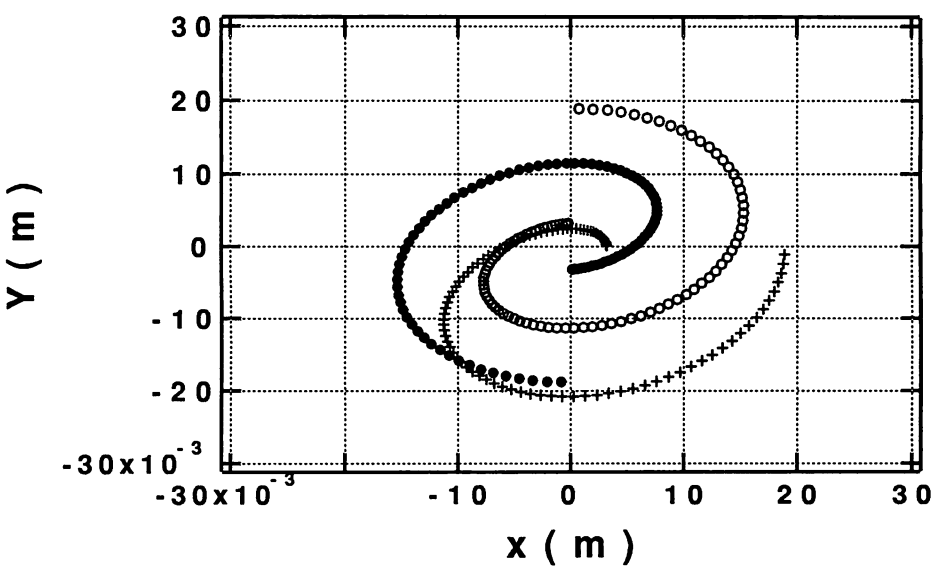
X-Y motion in chopper



in Plate1



in Drift space



in Plate2

Fig.2 Trajectories on X-Y plane for -90, 0 90 injected particles.

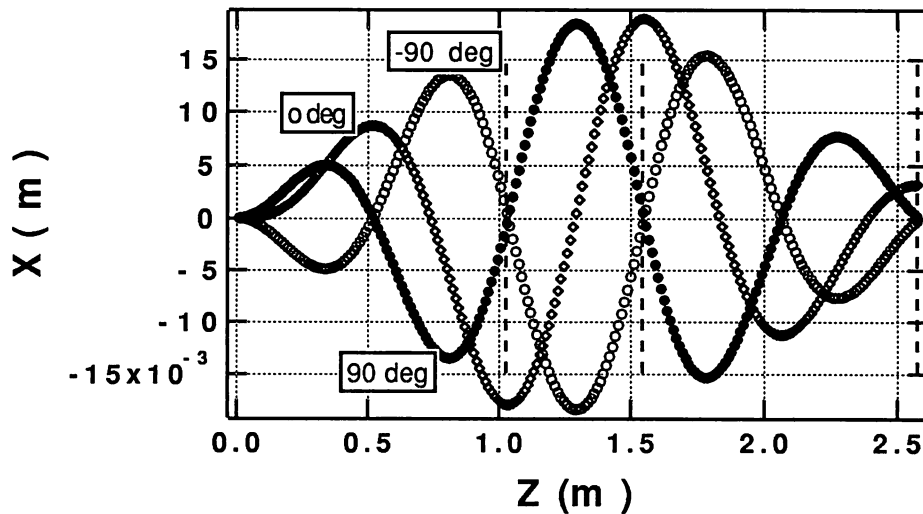


Fig. 3 X-Z trajectories.

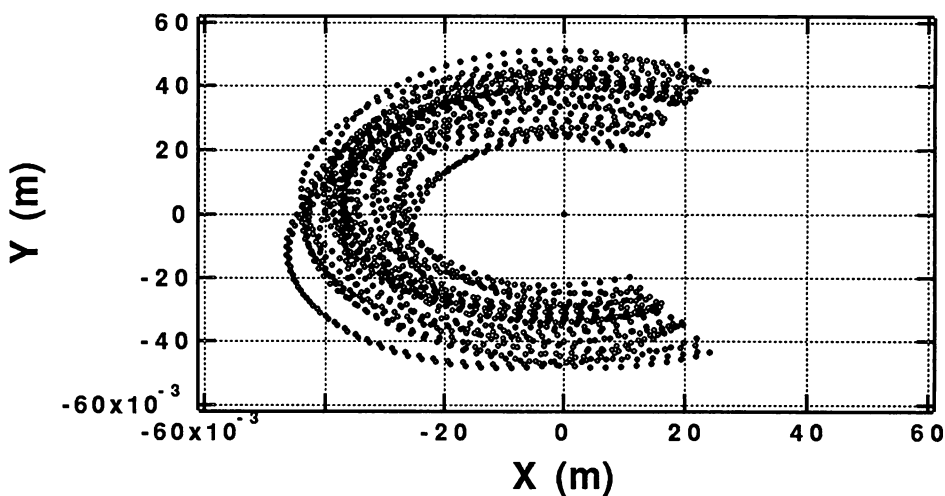


Fig.4 Beam profile on X-Y plane at the slit.
Slit angle is 120 deg.

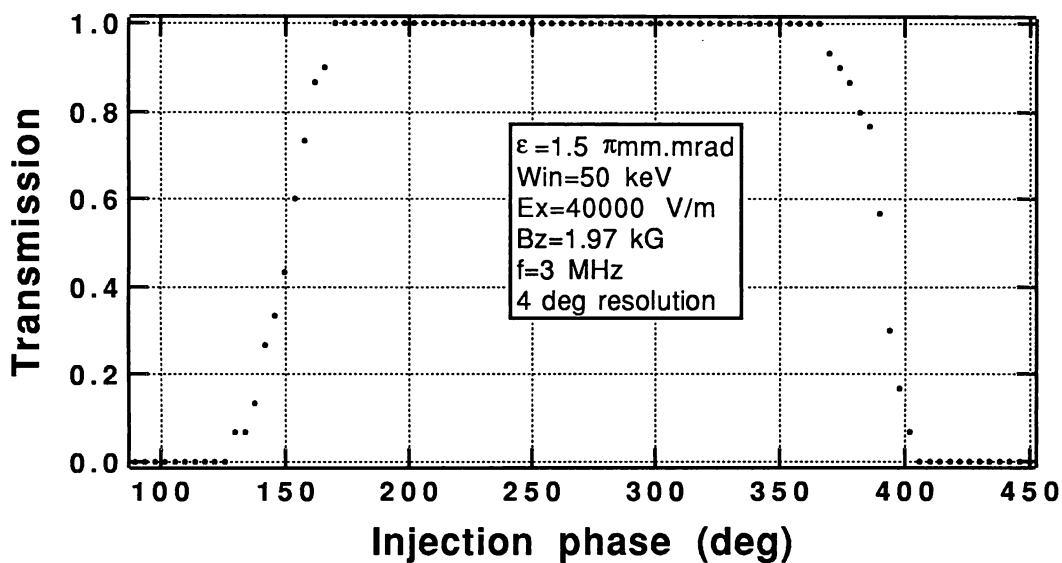


Fig. 5 Transmission ratio with 120 deg slit.