

T. Kato, Z. Igarashi, K. Ito, C. Kubota, Y. Mori,
A. Takagi, E. Takasaki, T. Takenaka, S. Fukumoto,
Y. Higashi, T. Hongo and D. A. Swenson*

National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

We made a plan of constructing an RFQ linac which will accelerate H^- ions of 25keV to 750keV at the rf test stand in KEK. Computer program 'QKEK' was developed. QKEK gives useful parameters of RFQ linac such as cell length, bore radius, modulation factor, vane voltage and particle energy by calculation of motion of a stable particle. It also includes six dimensional beam dynamics calculation and produces an output tape of vane geometry for machining by numerical milling machine. Parameters of RFQ linac were determined by the use of QKEK and SUPERFISH. A first model vane was machined in KEK workshop and satisfactory results were obtained.

§1. 序

KEKでは 偏極陽子前段加速器計画、及び H^- 加速計画が始まっている。そのスタートの時期が早かったためもあって、前段加速器は、Cockcroft-Walton型を使用し、750 keVまで加速し、linacへ入射する計画となっているが、最近注目されているRFQリニアックの可能性を調べて、将来の発展性を探るために、RFQモデルlinacを試作することにした。折よく、200MHzで出力2.5MWを有するRFテストスタンドは、今年度中に完成の見通しであり、又 H^- イオン源は順調に開発されているので、空洞の低レベルRFテストに加えて、ビーム加速テストの条件も整っている。こうした条件により 試作空洞の周波数は200MHzに選んだ。

§2. 理論

2-1 基本式

RFQリニアックの理論は、文献(1)(2)に詳しいので、ここでは空洞設計上必要な式を列挙する。notationは文献(2)と同じである。

$$U = \frac{V}{2} \left[X \left(\frac{r}{a} \right)^2 \cos 2\psi + A I_0(kr) \cos kz \right] \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$E_r = \left(-\frac{XV}{a^2} r \cos 2\psi - \frac{kAV}{2} I_1(kr) \cos kz \right) \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

$$E_\psi = \frac{XV}{a^2} r \sin 2\psi \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

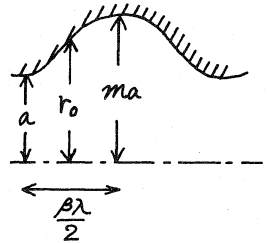
$$E_z = \frac{kAV}{2} I_0(kr) \sin kz \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

*Guest from LASL, Los Alamos.

$$A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \quad (5)$$

$$X = 1 - AI_0(ka) \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{\beta\lambda}, \quad r_0 = \frac{a}{\sqrt{X}}, \quad B = \frac{e\lambda^2}{mC^2} \cdot \frac{XV}{a^2} \quad (7)$$



2-2 コンピュータープログラム

RFQリニアックの形を計算し、6次元粒子の *beam dynamics* を計算するプログラム“QKEK”を開発した。初期入力パラメータは、 $E(z)$, $\phi(z)$, 最小半径 a_0 , 最大 modulation M_0 , 入射エネルギー W_{in} 等である。このプログラムでは、安定粒子の軌道を計算して、各セルの長さ、粒子の energy を逐次決定する。次に、 M_0 及び a_0 を用いて、ベインの間の電圧を求め、そのあと $E(z) = \frac{1}{2}(kAV)$ を解いて、各セルの m 及び a を決定する。又、製作の上で必要となるベインの形状は、KEK保有の Numerical Machine 用のプログラムに変換後、紙テープに打ち出す。最近LASLのRFQ計算プログラム—PARMTEQ—がKEKにて動くようになり、QKEKとの比較が可能となった。PARMTEQの特徴は、radial focussing parameter $B(z)$ と $M(z)$ を入力パラメータに用いていることである。同じ $B(z)$ を用いた両者の計算結果は、一致していると言える。

ある周波数におけるベインの断面形状は、SUPERFISHにより計算される。必要な *exciting power*, *surface peak field* 等についての情報も、SUPERFISHにより得られる。

2-3 計算結果

Table 1 及び Fig.1 に基本パラメータを示す。focussing parameter B を linac 内で定数に保つかどうかは、重要な選択となる。QKEKは入力パラメータを $E(z)$ で与えているので、一般には $B \neq const.$ となる。Fig.1 のパラメータは $6.4 \leq B \leq 8.1$ となっている。 $B \neq const.$ は平均半径 $r_0 \neq const.$ を導くから、rf特性の点からの考慮が必要となる。

Frequency	201.08 MHz
Input energy	25 keV
Output energy	750 keV
Number of cells	138
Length	121 cm
Initial radius	1.5 cm
Minimum radius	0.4 cm
Initial modulation	1.0
Final modulation	2.0
Initial phase	-90°
Final phase	-30°
Vane voltage	104 kV
Max. surface field	25 MV/m
Final accel. field	1.9 MV/m
Exciting power	70 kW
Capture efficiency	96 %
Acceptance	0.34 π cm, mrad

Table 1 RFQ parameters.

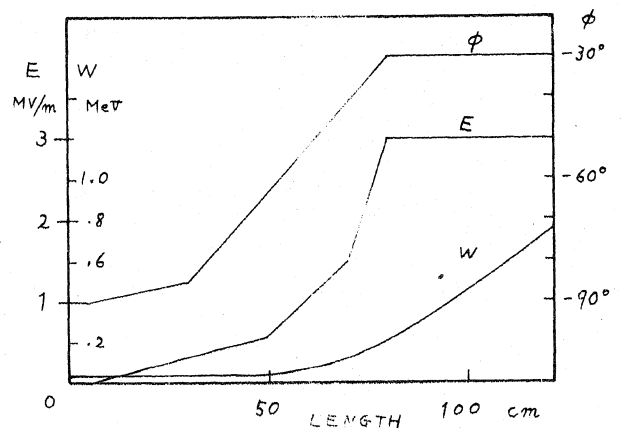


Fig. 1 RFQ parameters vs length.

もう一つの重要なパラメータは、放電に関係する peak surface field である。表の値 25 MV/m は、Kilpatrick field limit⁽³⁾ の 1.7 倍である。Fig. 2 に、SUPERFISH によって得たベイン上の表面電場の分布を示す。このベインにおいては、 $E_{\text{surface}} \sim 1.33 \sqrt{V_0}$ が得られた。

Fig. 3 に input energy に対する capture efficiency, Fig. 4 に phase oscillation を示す。25 keV における capture efficiency は 96% であり、 $\pm \Delta W/W_{\text{in}} \sim 10\%$ にわたって、90% 以上の効率を得ている。

Fig. 5 に SUPERFISH の計算に用いたベインの形を示す。Fig. 6 にベインの間の電圧を 100 kV に normalize する時に必要な exciting power P_c と共振周波数とを、ベインの角度 θ の関数として示す。

§3. ベインの製作

Table 1 にあげたパラメータのもとに、入射部分から 40 cm のベインを、銅を用いて試作した。KEK にある N.C. - FANUC 220A は $5 \mu\text{m}/\text{one pulse}$ の精度を持っている。送り速度 $300 \text{ mm}/\text{min}$, ボールエンドミルの半径 5 mm , 軸方向の pitch は 0.5 mm とした。

この部分の最大の modulation は、1.08 である。modulation のピーク値の計算値とのズレの測定結果を Fig. 7 に示す。

<参考文献>

1. I. M. Kapchinskii and V. A. Teplyakov, "Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focussing", Prib. Tekh. Eksp. No.2,19(1970).
2. K. R. Crandall, R. H. Stokes and T. P. Wangler, "RF Quadrupole Beam Dynamics Design Studies", 1979 Linear Accelerator Conference, p.205.
3. W. D. Kilpatrick, "Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc", RSI 28(1957)824.

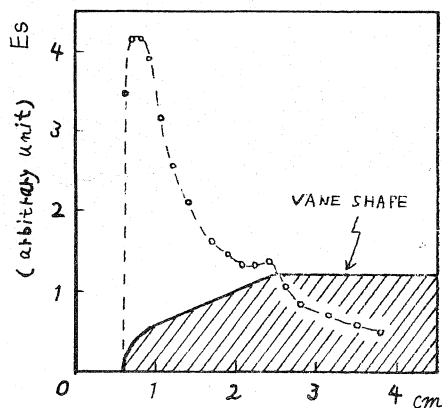


Fig. 2 Surface electric field on vane,

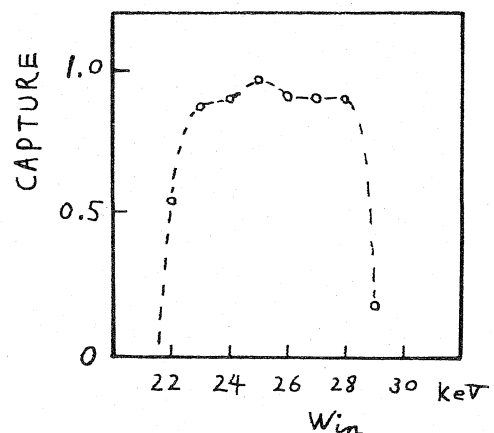


Fig. 3 Capture efficiency vs input energy.

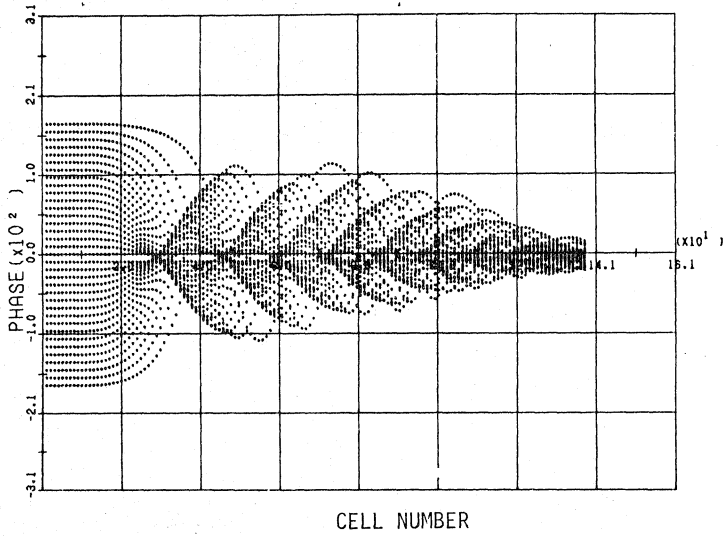


Fig. 4 Phase Oscillation.

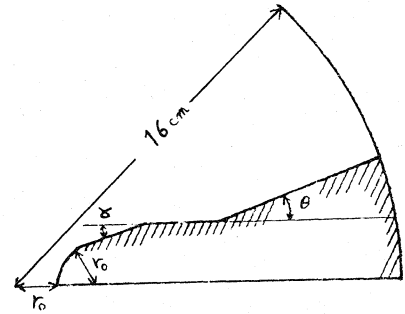


Fig. 5 Vane geometry.

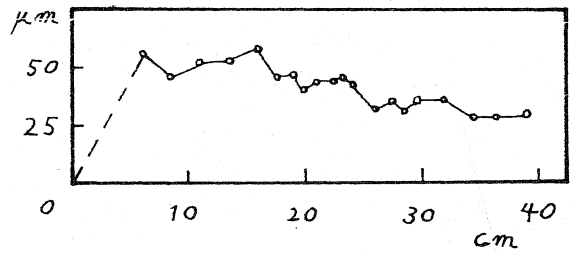


Fig. 7 Machining accuracy of vane tip.

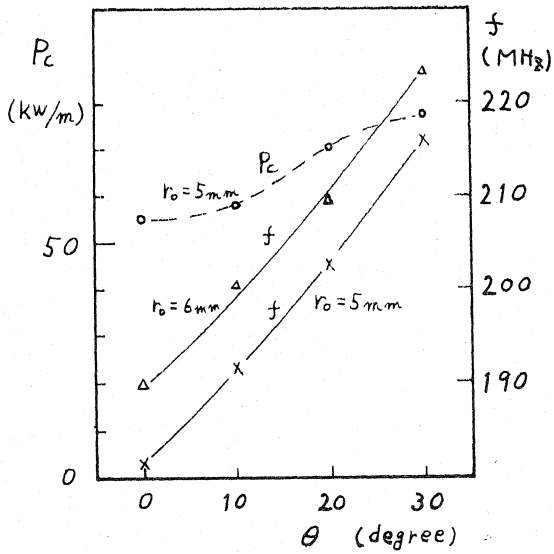


Fig. 6 Exciting power and resonant frequency vs angle θ .

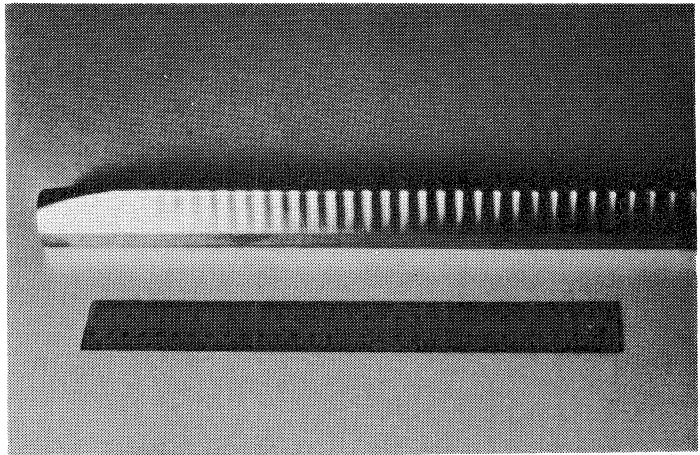


Fig. 8 A 40 cm long model vane.