

プリバンチャーのRF測定

加藤隆夫

20 MeV 陽子リニアックの捕獲効率が、期待通りの成績を上げていないので (50%), プリバンチャーの空洞共振器としての特性を測定した (1984年12月)。その後、85年11月から始まった 40 MeVリニアックの運転では、60% を越える捕獲効率を示した。これらの結果から次の様に考えられる。

1. プリバンチャーは正常に動作しており、必要な加速電圧を得ている。
2. 但し、on axisと off axisの加速電圧には、25%の差がある。
3. 捕獲効率が上昇したのは、H⁻加速となって emittance が良くなった為。

1) プリバンチャーの構造

$\lambda/2$ 波長の同軸型共振器であり、左右の可動短絡板を動かして共振周波数を粗調整し、その後周波数チューナーにより微調整する。Fig.1 に示すように、加速ギャップは二個あり (G1, G2), E_r 成分を加速に使用する。ギャップとギャップの間隔は 89 mm である。この長さは入射エネルギーが 750 keV ($\beta=0.04$) の時に、RF の位相差にして 3π に相当する。

プリバンチャーには入力カップラーが二つある (A, B)。A から RF 電力を供給し、B にはダミーロード (50 Ω) をつなぐ (スワンピングと呼ぶ)。通常の運転では、B カップラーのカップリング定数をある程度大きく選び、RF 電力をダミーロードへ逃がしている。これは空洞の Q 値を下げて安定な動作を得る目的と思われる。正常な状態の空洞をネットワークアナライザーで観測すると、Fig.2 に示すように共振カーブが一個見える。この時スワンピングのダミーロードをはずすと、Fig.3 に示すように、モードが二個に別れて共振周波数が大きく動いてしまう。(二つ目のモードはカップラーに依存するモードであった。)

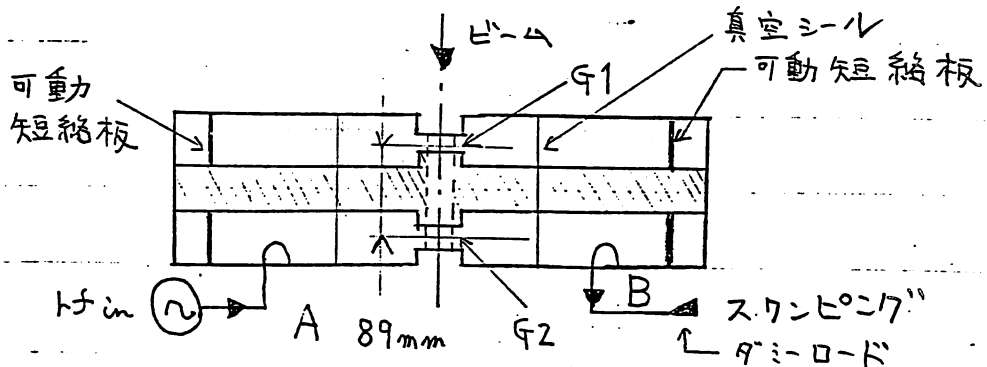


Fig.1 Structure of the prebuncher.

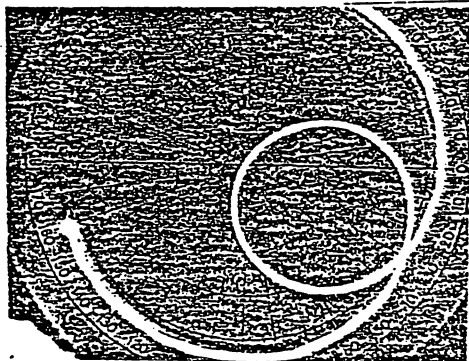


Fig.2 201.21 MHz.

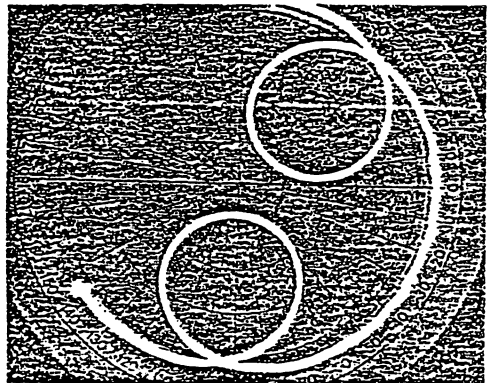
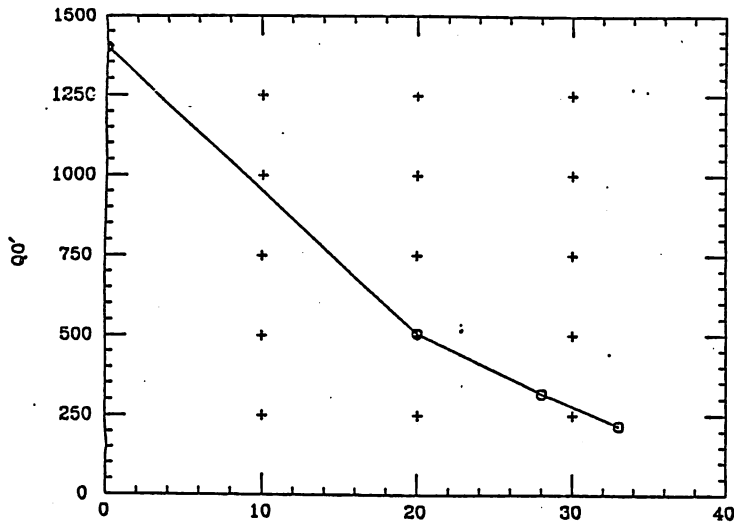


Fig.3 194.71 MHz, 207.02 MHz.



カップラー目盛り

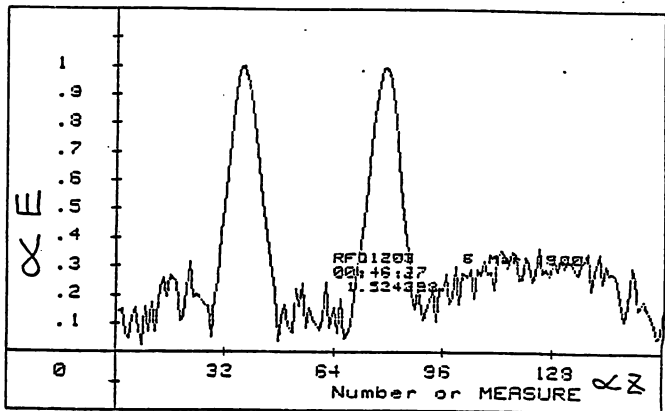


Fig.4 Q0' versus swamping. Fig.5 Accelerating field in the prebuncher.

以前、プリバンチャーの中へ RF電力がはいらなくなる故障があったが、その原因はスワンピング関係の不良であった。

カップラーBのカップリングの調整用の目盛りと、無負荷のQ値(Q0',本図ではスワンピングを含めて考える)との関係を Fig.4 に示す。スワンピングにより、Q値が大きく変わる様子がわかる。

rfカップラーとスワンピングのカップリング定数を β_1 、 β_2 とすれば、入力rf電力 P_{in} 、空洞内の消費電力 P_c 、反射電力 P_{ref} 、ダミーロードへ流れ出るrf電力 P_{sw} の関係は次式で与えられる。

$$P_c = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} P_{in}$$

$$P_{ref} = \frac{(1 - \beta_1 + \beta_2)^2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} P_{in}$$

$$P_{sw} = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} P_{in}$$

example

測定の時は、 $\beta_1=2.8$, $\beta_2=1.3$.
 $P_c=0.43P_{in}$, $P_{ref}=0.01P_{in}$, $P_{sw}=0.56P_{in}$.
 加速に使用される電力は、入力の半分以下となっている。
 loaded $Q_L=Q_0/(1+\beta_1+\beta_2)=275$, 但し $Q_0=1400$.

ところで、プリバンチャーのチューニングは、ネットワークアナライザーを用いて反射法で行うのが便利である。

$$Q_0' = Q_0 / (1 + \beta_2), \quad \beta_1' = \beta_1 / (1 + \beta_2)$$

とおくと $Q_0' = (1 + \beta_1') Q_L$

となるから、スワンピングを含めたQ値を Q_0' とおいたことになる。上式の諸量は簡単に測定出来るから、 Q_0 が予めわかっている空洞のチューニングに応用できる。

この場合には

$$P_o = \frac{4\beta_1' Q_o'}{(1 + \beta_1')^2 Q_o} P_{in}$$

$$P_{ref} = \frac{(1 - \beta_1')^2}{(1 + \beta_1')^2} P_{in}$$

$$P_{sw} = \frac{4\beta_1'}{(1 + \beta_1')^2} \left(1 - \frac{Q_o'}{Q_o}\right) P_{in}$$

スワンピングを含めて考える見かけ上の Q_o' は、 $Q_o' = Q_o / (1 + \beta_2) = 600$.

2) プリバンチャーの加速電場

ビード法により、加速電場を測定した (Fig.5). この測定から平均電場 E_o , transit time factor T を求めて表に示す。

	E_o/E_p	T	E_p
第1ギャップ	0.45	0.43	0.99
第2ギャップ	0.46	0.45	1.00

ここで E_p は peak 電場、 E_o, T は次式で与えられる。

$$E_o = 1/L \cdot \int_{-L/2}^{L/2} E dz \quad L = \beta \lambda, \beta = v/c$$

$$T = \int_{-L/2}^{L/2} E \cos(kz) dz / \int_{-L/2}^{L/2} E dz \quad k = 2\pi/L$$

peak電場を次の式から求める。

$$\Delta f_m / f = -3 \epsilon_o E^2 V / (4U)$$

Δf_m は、測定の最大周波数変化、

$$Q_o = \omega U / P_o$$

$$\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-12},$$

$$E_p = \sqrt{\frac{-4 \Delta f_m P_o Q_o}{3 \epsilon_o V f \omega}}$$

U = stored energy,

V = volume of the bead,

$$= 360 \sqrt{P_o Q_o}$$

P_o = dissipation power,
 f = resonant frequency.

二つの加速ギャップによる加速電圧は、

$$v(V) = E_{o1} T_1 L + E_{o2} T_2 L = 8.6 \sqrt{P_o Q_o} = 324 \sqrt{P_o (W)}.$$

空洞内の消費電力と得られる加速電圧との関係を Fig.6 に示す。
transit time factor が小さいのは、ギャップ間隔 (9.5 mm) に比べて bore radius (36 ϕ) が大きい為と思われる。

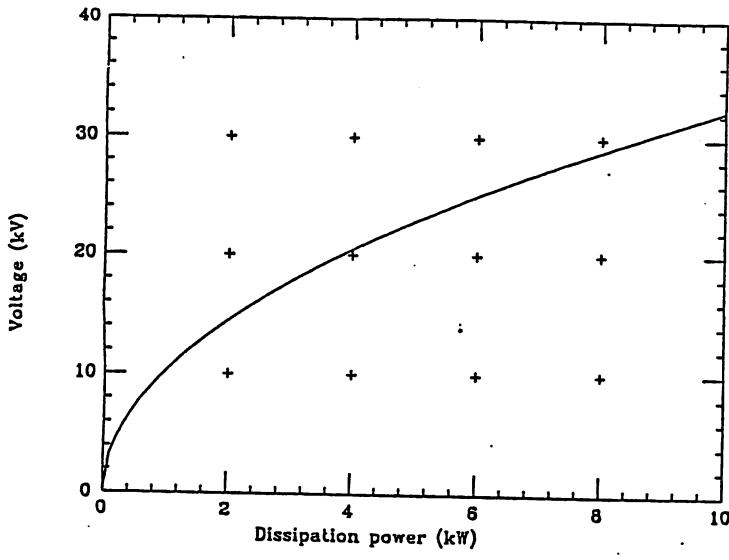


Fig. 6 Accelerating voltage vs dissipation power.

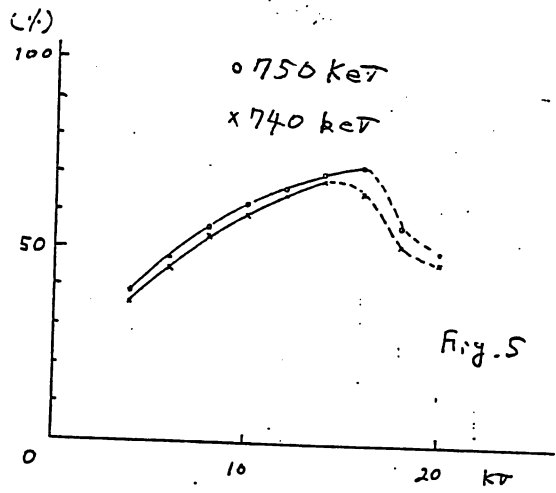


Fig. 7 Longitudinal capture efficiency vs prebuncher voltage.

上述の方法よりも、average shunt impedance R を定義して関係式を導く方が一般的であり、より正確といえる。

$$R = \frac{1}{P_o} \sum E_n^2 L_n = \frac{L}{P_o} (E_1^2 + E_2^2)$$

$$R / Q_o = L (E_1^2 + E_2^2) / \omega U$$

$$= \frac{2(\Delta z)^2}{3190} / (3\pi \epsilon_o f V L) [(\sum_1 \sqrt{-\Delta f/f})^2 + (\sum_2 \sqrt{-\Delta f/f})^2]$$

$Q_o=1400$ の時、 $R=4.5 \text{ M}\Omega/\text{m}$ となる。 Δz はビードデータの間隔。

以上の測定は軸上の電場を測定している ($r=0$)。次に軸から 12 mm だけ外側 ($r=12$) にて、同じ測定をすると、加速電圧は +24%, peak 電場は +58% 大きい結果が得られた。これらの測定では、電場の縦成分 (加速又は E_r 成分) と横成分を同時に測っているの、更に詳しい解析をするには、二つの成分を分離して測るか、又は、計算機で空洞の simulation をする等が必要となる。

3) プリバンチャー加速電圧とリニアックの縦方向の捕獲効率

プリバンチャーは、Cockcroft-Walton 加速器からくる DC ビームに位相変調を与える事により、リニアックの energy-phase アクセプタンスへ入射する粒子数を増やす働きをする。加速電圧と捕獲効率との関係を Fig. 7 に示す。約 16 kV の加速電圧があれば充分だから、 $P_o=2.4 \text{ kW}$ が必要である。

4) まとめ

今までの運転では、スワッピングを大きくきかせて、スワッピングを含めた Q_o' を約 600 位に選んでいた。この時、入力電力 5.6 kW が必要となるが、現在の rf 電源で充分対応できる。実際 1985 年 11 月からの エミッタンスの小さい H^- 加速において、60% を越える効率が得られている。しかし加速電圧を上げていくと、(入射電力に比べて) すぐに over bunching 状態になる事、効率が理論値には及ばない事などの問題がある。