

プリバンチャーの動作解析

加藤隆夫

まとめ

- 1) プリバンチャーの電磁場分布の解析をした。その結果、グリッドリングは電場の一様性を保つ為に重要である事がわかった。
- 2) 空間電荷を考慮したビームシミュレーションにより、プリバンチャーシステムの振る舞いを明らかにした。
- 3) 電流が 20 mA 以下では、空間電荷効果による動作特性の劣化は殆ど無いと言える。

序

今から6年前、1985年に、筆者はプリバンチャーの高周波特性の測定を行ない、報告した(参考文献1)。その中で、残念ながら出来なかった事を宿題として残しておいた。

”更に詳しい解析をするには、二つの(電場)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。”

この程、二つのコンピュータコードの利用により、新たにプリバンチャーの解析ができたので報告する。利用したコードは、3次元電磁場解析コードMAFIAと、ビームトラッキングコードLEBTである。

1) プリバンチャーの概要

プリバンチャーの概略図を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。空洞は、半波長の長さの同軸共振器である。共振周波数を 201 MHz とすれば、半波長は 746 mm となる。この長さで空洞を作ると、電場は最大で磁場が最小となる中心部において、二つの加速ギャップを作って容量を持たせているので、共振周波数は低くなってしまふ。そこで、同軸方向の長さ(左右の短絡板により決める)を短くして(583 mm)共振周波数を 201 MHz に合わせている。なお、長さ 583 mm の同軸共振器の共振周波数は 257.1 MHz (MAFIA では 258.2 MHz が得られた)である。

二つのギャップの間隔は 89 mm である。これは、750 keV の陽子が高周波の 1 周期に走る距離 ($\beta = 0.04$, $\beta\lambda = 59.7$ mm) の 1.5 倍になっている。

従って、二つのギャップの電場が逆位相になっている事 (Fig. 3 参照) を考慮すれば、陽子は二つのギャップで同位相で加速される事になる。加速ギャップの周辺だけ取り出すと、中心に1個のドリフトチューブがあり、前後にハーフドリフトチューブがついている構造と考えられる。

ビーム孔の直径は 36 mm と大きく設定されている。後続のドリフトチューブにビームを絞り込む為に、プリバンチャー周辺のビーム半径は大きくなっている (エミッタンスが $3\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ の時、x 方向 17 mm、y 方向 13 mm、Fig. 13) ので、この大きさでも充分ではない。しかしながら、第2節で示すように、直径が大きすぎる為に、ビーム孔の加速電場分布が悪く、なんらかの形で補正しなければ (ここではグリッドリングにより補正する)、ビームの質を落とす結果となる。

同軸部分に二つの高周波カップラーがあり、一つを入力カップラーとして使い、他方には、整合負荷をつないで高周波電力を吸収し、空洞の負荷 Q 値 (Q_c) を下げて運転している。

2) MAFIA によるプリバンチャーの電磁場計算

MAFIA V.3.0 を使って、3次元の電磁場を計算した。使用したメッシュ数は、 $41 \times 41 \times 95 = 159695$ であり、計算時間は 89 分である。基本モードの電場分布を Fig. 3 に、磁場分布を Fig. 4 に示す。加速電場 (E_z) の Z 方向の分布を Fig. 5 に示す。中心軸から 5 mm、12 mm 離れた場所の分布も同時に示しており、中心軸上の最大値で規格化している。この図より、中心軸から 12 mm 離れた所では、中心軸の値よりピーク値で 62 % 大きい事がわかる。又、電場がドリフトチューブの中へ大きく漏れ込んでいる様子がわかる。加速ギャップの中心における加速電場 (E_z) の X-Y 平面上の分布を Fig. 6 に示す。これらの図が示すような、Z 方向の分布が大きく異なる場合には、電場分布を反映するパラメーター T (transit time factor) が大きく変わる。Table 1 に、平均電場 E_0 、T、 E_0T をまとめて示す。 E_0 と E_0T は、 $x=0$ の値で規格化している。

Table 1 $x=0, 5, 12 \text{ mm}$ における加速のパラメーター (MAFIA の出力から計算した)

(グリッドリングがない場合)

位置	E_0	T	E_0T	$T(x)/T(0)$
$x=0$	1.0	0.49	1.0	1.0
$x=5$	1.00	0.52	1.06	1.06
$x=12$	1.03	0.70	1.46	1.42

Table 1 より、軸から 12 mm 離れた位置では、実効加速電場は 46 % 増加して

おり、これはビームダイナミクスに大きな影響を及ぼす事が予想される。

実は、ここまでの話は、6年前のレポートに記した測定結果とほぼ一致しており、実際、軸上と軸外のtransit time factorの比が、

$$T(r)/T(0) = I_0(kr), I_0(x) = 1 + x^2/4 + x^4/64 + \dots \text{ (変形ベッセル関数) } , k = 2\pi/\beta\lambda$$

で与えられるので、予測される事である。Tの比は、上式では、5 mmで1.07、12 mmで1.43となり、Table 1に示したMAFIAの結果と良く一致している。

さて、Rutherford (及びBNL)の設計者は、さすがにこの点を改良する工夫をしている。それが、グリッドリングである。Fig. 7に計算に使用したグリッドリングの概略を示す。このリングがドリフトチューブの四箇所に入っている (Fig. 1)。計算では、メッシュ数の制限からグリッドの幅を広くしているが、実際には、幅0.1 mmのグリッドが3枚等間隔ではいつている。このグリッドが等電位面を作ると考えれば、ビーム孔のサイズを実効的に非常に小さくする結果になる。

Fig. 8に加速ギャップの中心 ($Z = 89/2$ mm)における加速電場 (E_z)のx-方向の分布を示す。これは、Fig. 6の一つの断面を表示している事になる。グリッドリングの効果は顕著である。Fig. 9とFig. 10に加速電場の分布を示す。グリッドリングがある場合の加速パラメーターをTable 2に示す。

Table 2 x=0, 5, 12 mmにおける加速のパラメーター (MAFIAの出力から計算した)

(グリッドリングがある場合)

位置	E_0	T	E_0T
x=0	1.0	0.91	1.0
x=5	1.02	0.93	1.04
x=12	1.02	0.94	1.05

加速電場の一様性の観点から見て、グリッドリングは非常に優れている事がわかる。一つ欠点をあげれば、僅かのビームロス (約10%)を生じる事である (参考文献2)。従って、出力ビームの仕様からグリッドリングを使うかどうか決める必要がある。

Fig. 11-1に軸から12 mm離れた場所の電場成分 E_z と E_y を示す (グリッドリングが無い場合、 $x=12, y=0$)。 E_y は、ギャップを中心にして符号が変わっている。粒子の透過時間とプリバンチャーの運転法の最適位相の選び方を考慮すれば、安定粒子 (z方向へ加速も減速もされない粒子) は y方向へ加

速される。安定粒子に対して 90° 位相がずれている粒子は、 y 方向の加速を受けない。従って、プリバンチャーによりバンチングされる粒子の一部分は横方向に力を受け、エミッタンスの増加の原因となる。グリッドリングはこの点も改良すると考えられる (Fig. 11-2)。

最後に参考文献 (1) との比較をしておこう。計算によれば、軸から 12 mm 離れた所では、ピーク加速電場は軸上に比べて 62 % 大きい (Fig. 5)。測定では、58 % となっている。軸上の transit time factor は計算で 0.49、測定で 0.45 である。軸から 12 mm 離れた所の加速電圧 ($E_0 T$ に比例する量) は、軸上に比べて測定値は 24 % 大きくなっていて、計算では、軸から 12 mm 離れた所では、中心に比べて 46 % 大きい電場となり、測定の約 2 倍である。測定と計算の違いの理由は、よくわからないが、この付近は急激に z 方向の電場が変わるところであり (Fig. 8)、測定のビード位置の設定が不正確であった点が指摘できる。精密な測定が、更に必要である。

3) プリバンチャーのビームシミュレーション

計算コード LEPT を用いてプリバンチャーのビームシミュレーションを行なった。このコードは、RFQ と DTL の間のビームの運動を調べる為に新たに書いたコードであり、その特長は、

1. 3次元計算 (x, y, z, t) を行なう、
2. 空間電荷効果を P-P 法 (particle - particle 間のクーロン力) で直接計算する、
3. スーパーコンピュータ (c-系) 用に使われている、

の 3 点を強調できる。特に第 3 項は、実用上重要であり、ここでは、スカラコンピュータ (B-系) に比べて、30 倍以上早い計算速度を得ている。従って、c-系約 20 分の計算時間は B-系換算で 600 分となる。

プリバンチャーと DTL の間のビームラインを Fig. 12 に示す (参考文献 3)。図の中の数値は、以前に筆者が使っていた値と若干異なる点があるが、本質的な差はないと思われる (下段の注参照)。Fig. 13 にベータファンクションを示す。入射ビームには 100 % エミッタンスが $3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ の K-V 分布を用い、エネルギー幅はゼロ、位相幅は 360° とした。twiss parameters は、リニアックのアクセプタンスにマッチするように決めた。なお、計算では、簡単の為にプリバンチャーを一つのギャップ (ギャップ長さ 10 mm) に置き換えた。そのギャップはプリバンチャーの中心に位置させた。ギャップの中の電場は一樣と仮定しているので、transit time factor は 0.95 となる。

DTL の捕獲効率を Fig. 14 に示す。捕獲効率は、DTL のアクセプタンスの位相幅に入射出来る粒子を勘定した。厳密にはエネルギー幅の条件も加えるべきであるが、Fig. 16 からわかるように、エネルギー幅の条件は、アクセプタンスの端以外の粒子には殆ど効果がないので、大きな誤差は生まないと思

われる。又、一般にDTLの横方向のアクセプタンスは入射ビームの10倍近くはあるので、こちらは考えなくてよい。従って、Fig. 14で、捕獲効率が電流の増大と共に下がる理由は、バンチが縦方向に広がるからと言える。

注) 電圧の事

Fig. 14の横軸の電圧と、参考文献(1)のFig. 7の電圧とは、数値が違っている。この理由は、第一に、計算に使用したビームラインの長さが13cm近く違う事に由来する。この長さの違いの原因は、以下の3点による。

1) 本計算では、プリバンチャーの中心をギャップとしているのに対して、文献(1)では、第1ギャップを使用していた事により4.5cm異なる

2) 計算の終わりを本計算ではDTLの端板に設定しているが、文献(1)では第1ギャップ中心までとしていた事により約3cm異なる。

3) そして、DTLの端板の内側と外側(端板の厚み)に起因すると思われる寸法測定の違いが残りの6.5cmの原因であろう。

第二の理由は、本計算ではギャップ間電圧を意味しているのに対して、文献(1)では、有効電圧を意味している事である。これによる差が約5%程度と思われる。

加速電圧が25kVの時の、ビームラインにおける横方向エミッタンス増加の様子をFig. 15に示す。プリバンチャー入り口とDTL入り口のエミッタンスを比較している。この増加の原因は、バンチングにより電荷密度が局所的に増大したためである。その様子をFig. 16以下に示す。

電流がゼロの場合の縦方向の位相平面上の様子をFig. 16に示す。この図はDTLへの入射直前の様子を表している。電流が200mAの場合の様子をFig. 17に示す。バンチが形成されている中心部では、空間電荷効果の為に大きく歪められている事がわかる。これは、縦方向の場合を示しているが、同じ事は横方向にも起こり、エミッタンスの増加をもたらす。Fig. 18に示したのは、電流が200mAの場合のx-方向のビームのエミッタンスである。

空間電荷効果が存在しても、電荷分布が一様で、空間電荷効果による力が線形な力になる場合には、エミッタンスの増加が起きないように出来る。プリバンチャーは、サイン波の電圧によりエネルギー分布に変調を与え、密度変調を起こしているから、空間電荷による力は、線形な力から大きく、ずれる結果となる。ビームの平均半径に相当する楕円体を仮定して、その中にビームが一様に分布するとして、エミッタンスの増加を伴わない空間電荷力を計算する。それと実際のバンチの中の各粒子に働く空間電荷力を比較した結果をFig. 19(縦方向)とFig. 20(横方向)に示す。図の中の濃い直線に各点が集まっ

ていれば一様分布に近いと言える。これらの図から縦方向には、特に強い空間電荷力が働く結果、Fig. 17 に示したようにエネルギー分布まで大きく変える事がわかる。エネルギー分布を Fig. 21 (20 mA) と Fig. 22 (200 mA) に示す。エネルギーの高い粒子はバンチの中心に後ろから近づくから（進行方向に関して）、空間電荷力により減速されてエネルギーが下がる。従って、Fig. 21 の両端の鋭いピークは内側にシフトして、分布の一様性は高まる事になる。従って、電流を増やしていくと、ある一定のエネルギー幅に入る粒子数が最大になる事が予想される。実際、ある特定の場所で（ここではDTLの入り口）観測すると、Fig. 23 に示すように90% エネルギー幅は大きく変化している。電流が300 mA の時のエネルギー分布はFig. 24 に示すように鋭くなっている。

大昔、200 mA 以上の陽子を入射させて、プリバンチャーによる横方向エミッタンス増加を測定して、13% の増加 ($y-y'$, 90%) を得ている（参考文献4）。計算では6% ($x-x'$)、30% ($y-y'$) となったが、その当時の陽子の $y-y'$ は、現在の計算の $x-x'$ に対応しているので、測定は計算の2倍となる。正確に比較するためには、ビーム強度、プリバンチャーの運転パラメーター、横方向のチューニング等の詳しいデータが必要である。ひとつ注意しておきたいのは、バンチングが進むにつれてエミッタンスの増加が著しく進むことである。Fig. 25 にエミッタンス増加を場所の関数として示してある。DTL の直前の、普通エミッタンスモニターが置かれる場所 (0.75 m 付近) は、エミッタンス増加が急激に起こり始める場所に相当する。従って、リニアックのエミッタンス増加をどの地点で定義しているかを明らかにしておかないと、混乱の素になる。

エミッタンス増加に非対称性がある事が、Fig. 15、25 からわかる。この点については、更に計算をしている所だが、入射ビームの横方向のマッチングの具合と、ビームライン上のビームサイズに依存している事がわかっている。

参考文献

- 1) プリバンチャーのRF測定、加藤隆夫、ASN - 244, 1985.
- 2) KEK 20 MeV 陽子リニアックの新強度記録、穴見他、1979 年第4回リニアック研究会、p.40, 1979.
- 3) 高木昭氏の資料を借用した。
- 4) Prebuncher によるEmittance の変化、坂上他、ASN - 58, 1977.

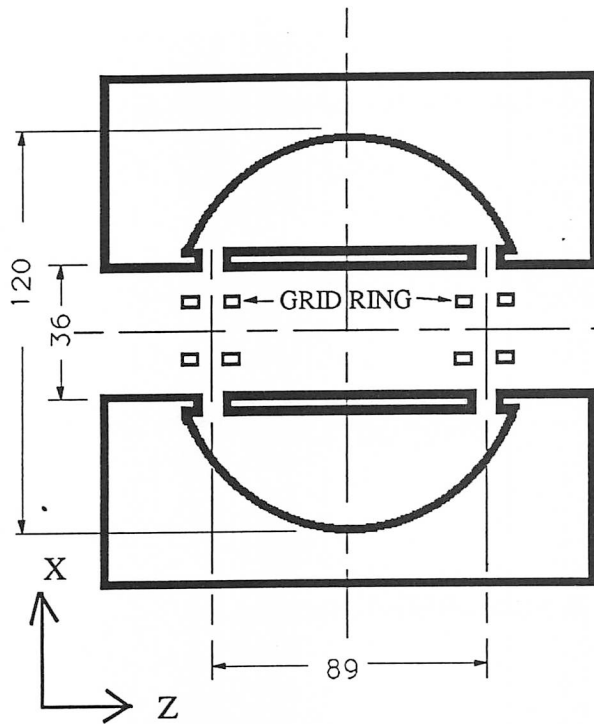


Fig. 1 Geometry of the prebuncher (side view).

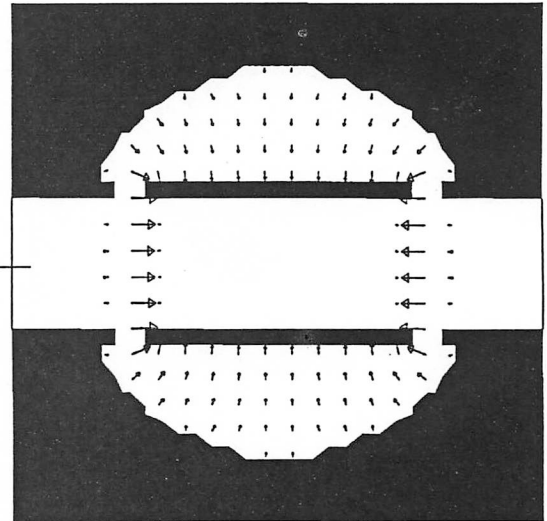


Fig. 3 Calculated electric field in a z-x plane.

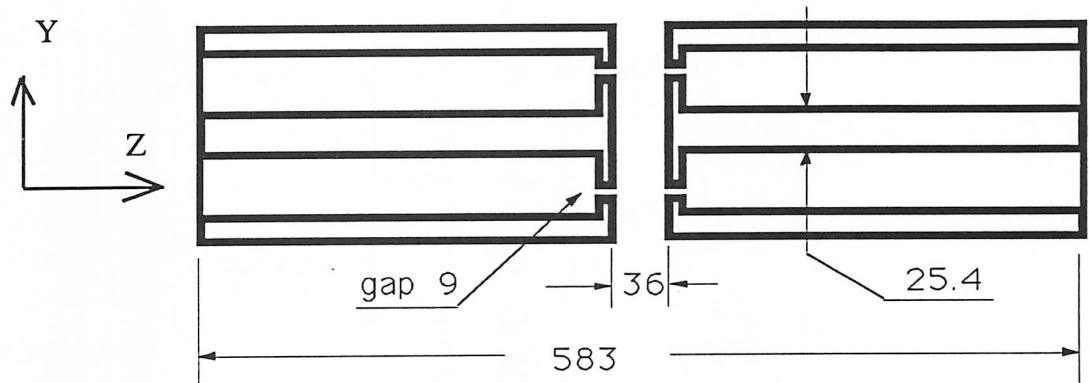


Fig. 2 Geometry of the prebuncher (top view).

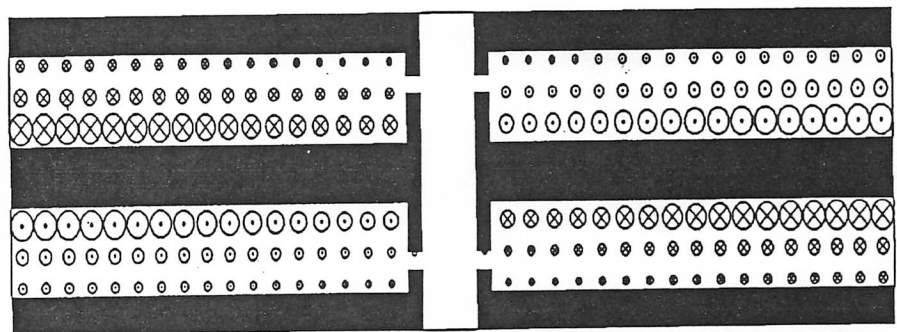


Fig. 4 Calculated magnetic field in a y-z plane.

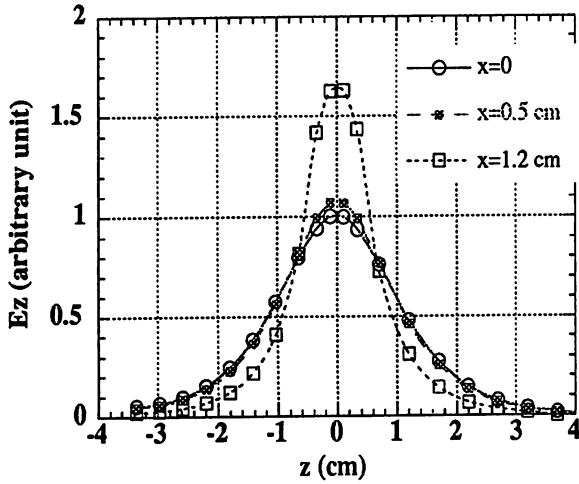


Fig. 5 Calculated electric fields in the z-direction at $y=0$ for the no-grid-rings prebuncher. $z=0$ stands for the gap center.

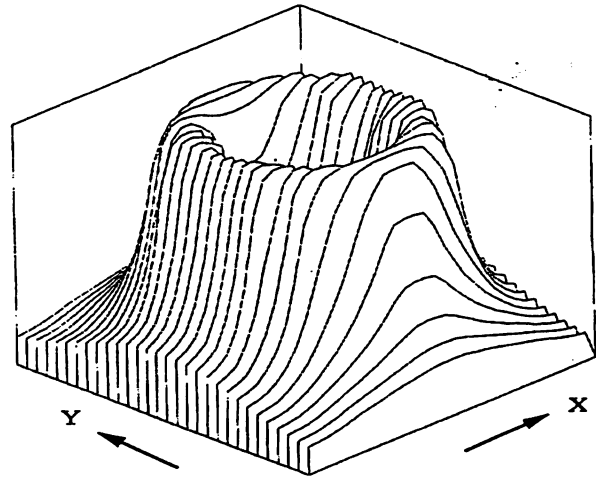


Fig. 6 Calculated electric fields E_z in the x-y plane in the gap center.

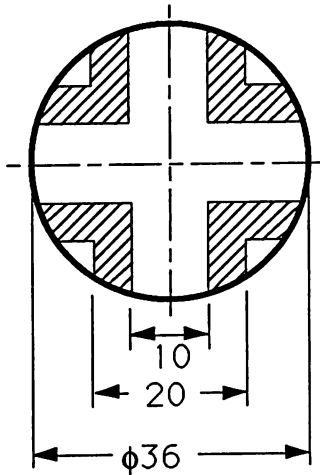


Fig. 7 Geometry of the grid-ring used for the calculation.

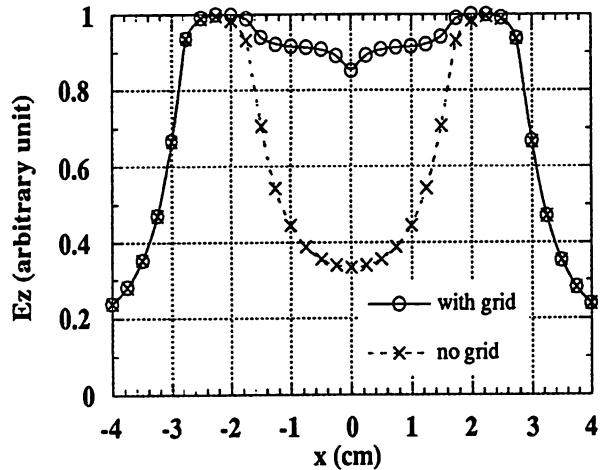


Fig. 8 Calculated electric fields in the x-y plane in the gap center. The circles indicate the fields with the grid-rings. The crosses indicate those without the grid-rings.

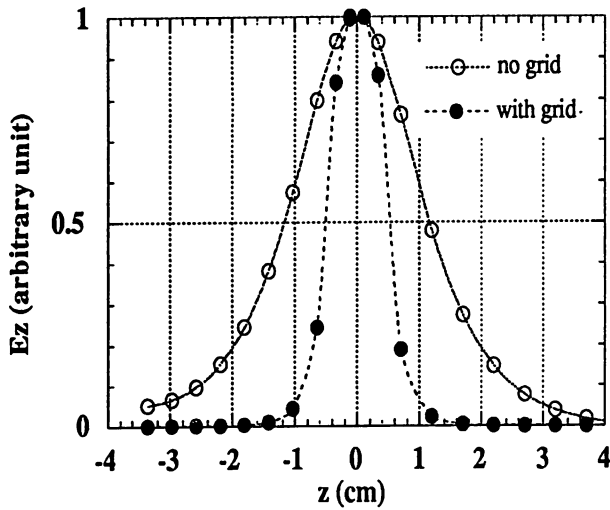


Fig. 9 Calculated electric fields on the z-axis. The black circles indicate the fields with the grid-rings. The white circles indicate those without the grid-ring.

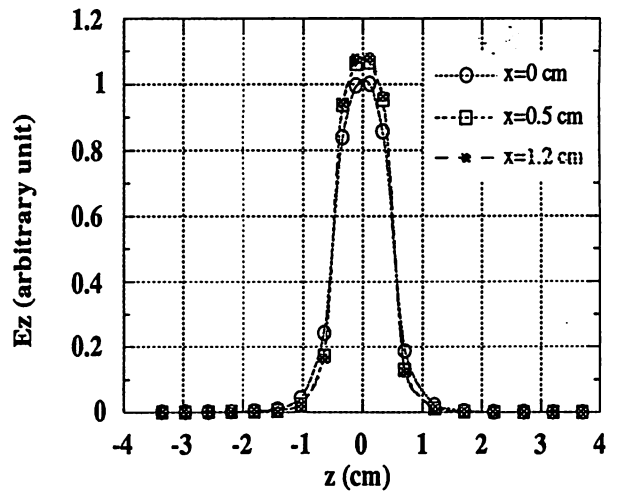


Fig. 10 Calculated electric fields in the z-direction at $y=0$. The grid-rings are used.

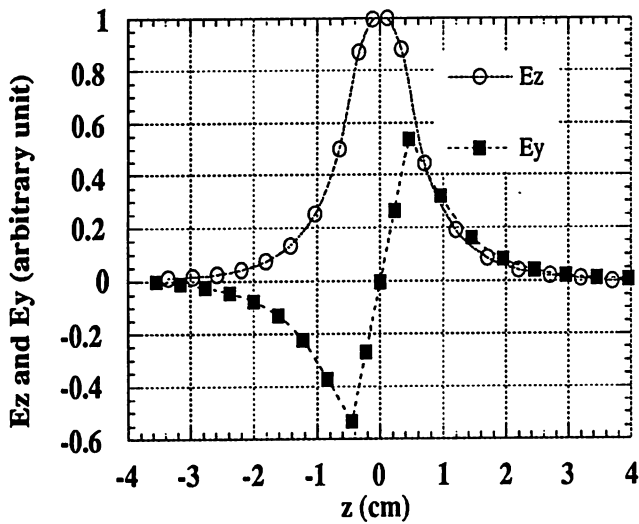


Fig. 11-1 Calculated electric fields (E_z and E_y components) on an axis separated from the z-axis by 12 mm. The grid-rings are not used.

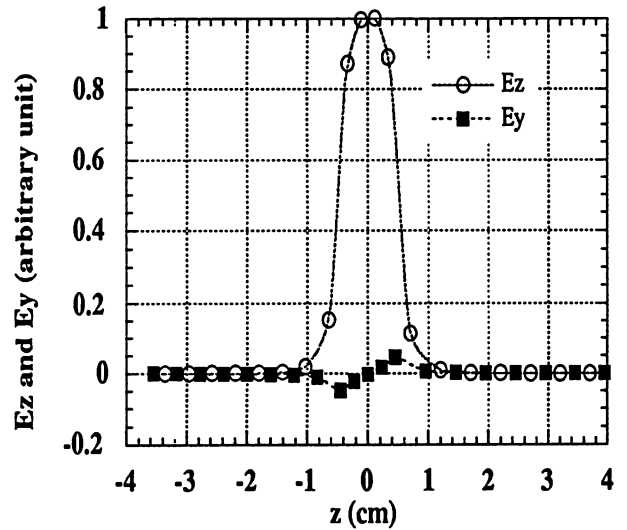


Fig. 11-2 Calculated electric fields (E_z and E_y components) on an axis separated from the z-axis by 12 mm. The grid-rings are used.

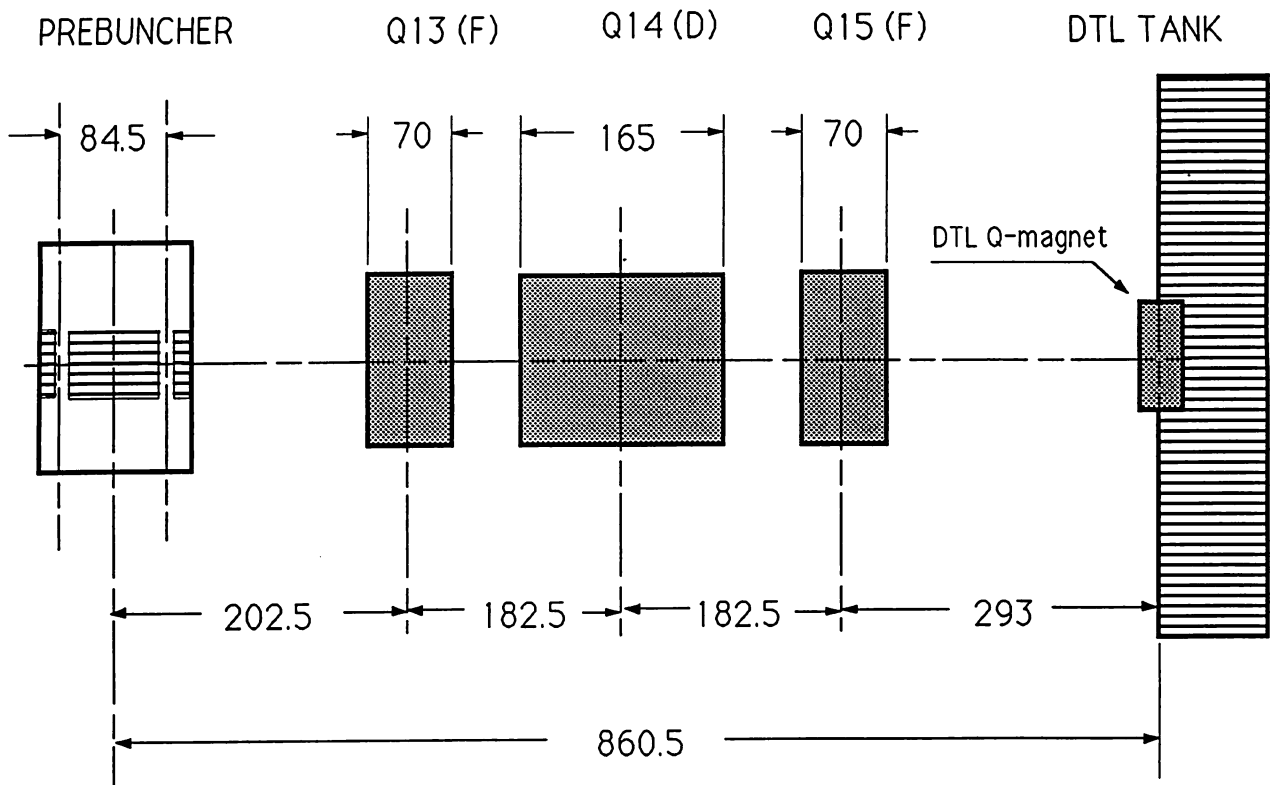


Fig. 12 Beam line between the prebuncher and the DTL.

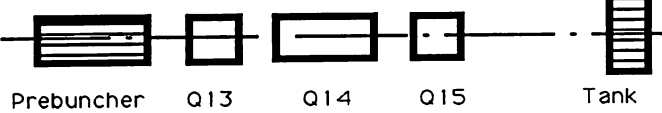
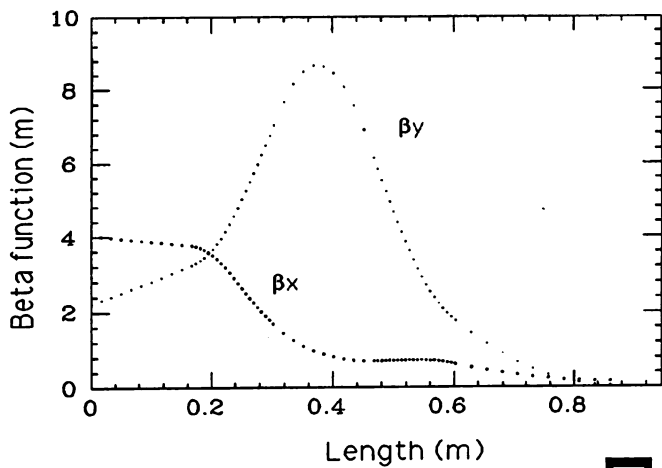


Fig. 13 β -functions of the beam line.

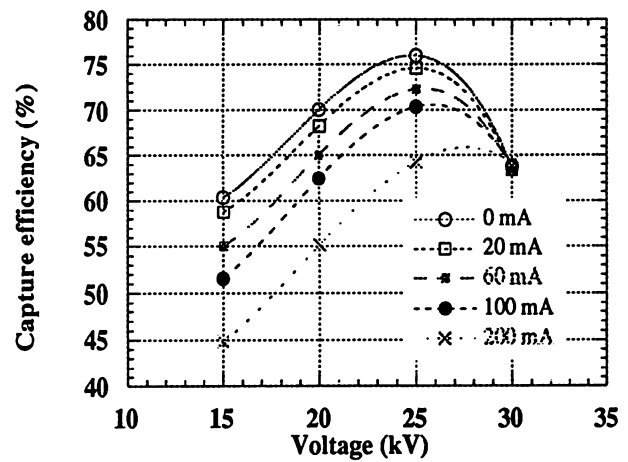


Fig. 14 Capture efficiencies of the DTL for five kinds of currents. An rf stable angle of the DTL is assumed to be -26 degrees.

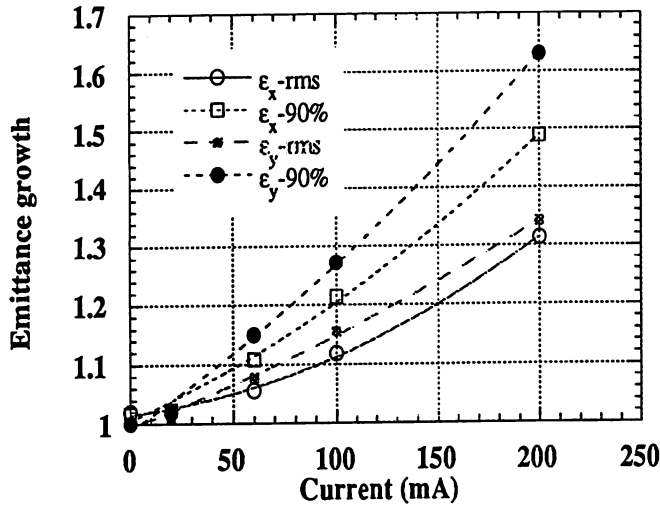


Fig. 15 Calculated emittance growth caused by the space-charge effects in the beam line.

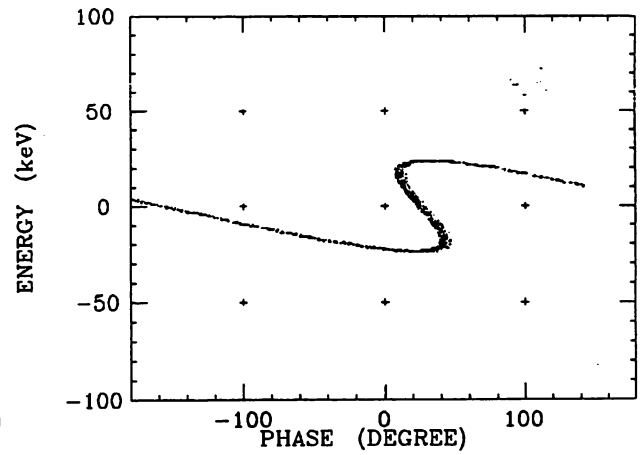


Fig. 16 Calculated longitudinal emittance for zero current at the DTL entrance. The buncher voltage is 25 kV.

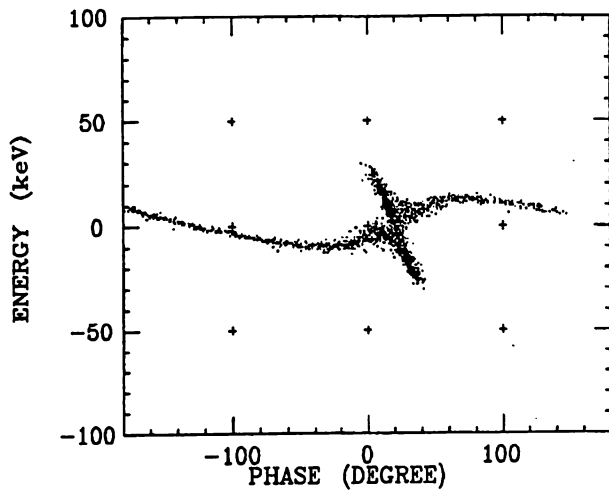


Fig. 17 Calculated longitudinal emittance for a 200-mA beam at the DTL entrance. The buncher voltage is 25 kV.

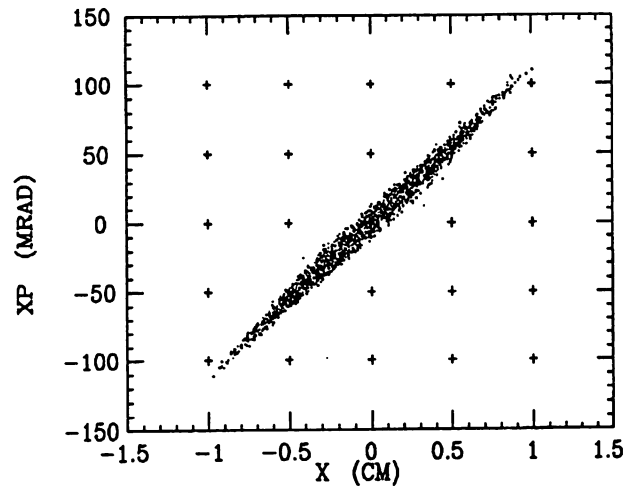


Fig. 18 Calculated transverse emittance for a 200-mA beam at the DTL entrance. The buncher voltage is 25 kV.

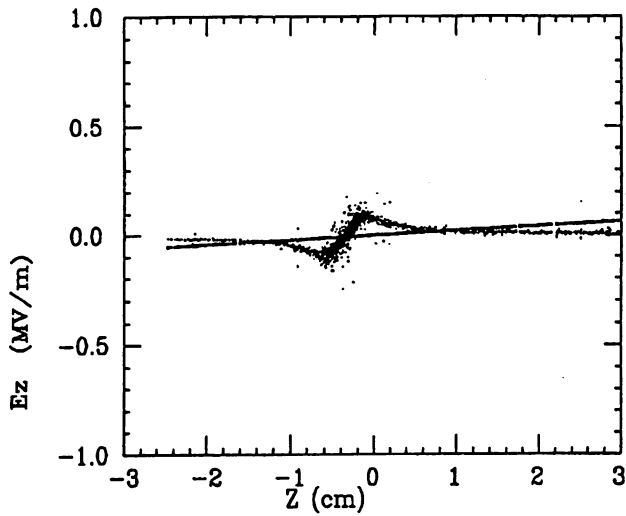


Fig. 19 Z-components of the electric field arising from space charge (200 mA) at the DTL entrance. The dots indicate the results of the exact calculation for each particle. The inclined-line indicates the calculated values with the uniformly distributed equivalent ellipsoid.

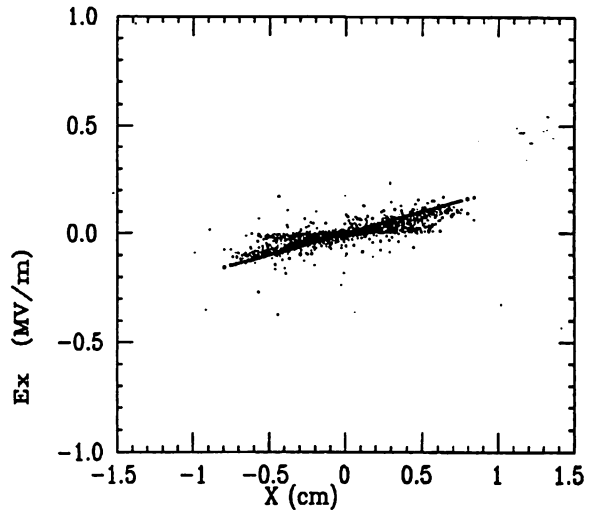


Fig. 20 X-components of the electric field arising from space charge (200 mA) at the DTL entrance. The dots indicate the results of the exact calculation for each particle. The inclined-line indicates the calculated values with the uniformly distributed equivalent ellipsoid.

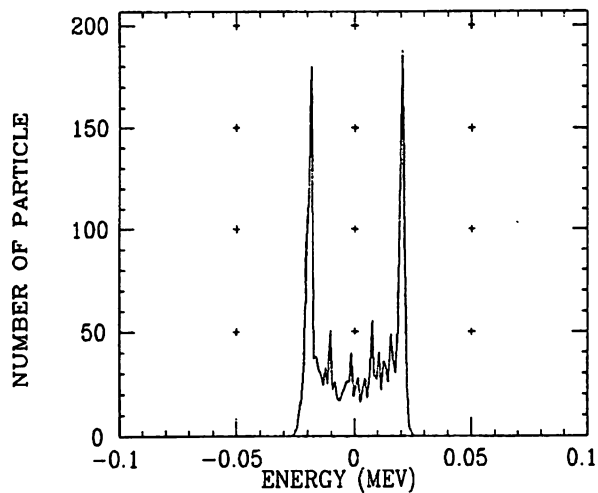


Fig. 21 Calculated energy distribution for a 20-mA beam at the entrance of the DTL. The buncher voltage is 25 kV.

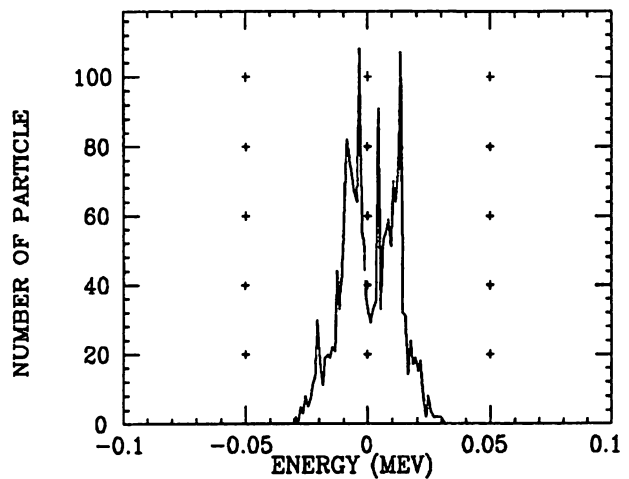


Fig. 22 Calculated energy distribution for a 200-mA beam at the entrance of the DTL. The buncher voltage is 25 kV.

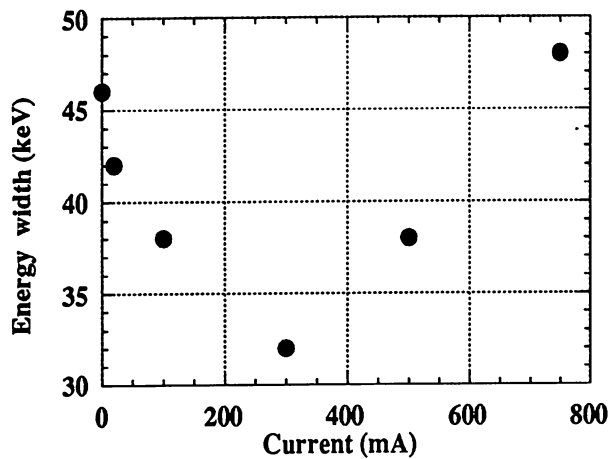


Fig. 23 Variation of the energy-width (90%) versus current. The buncher voltage is 25 kV.

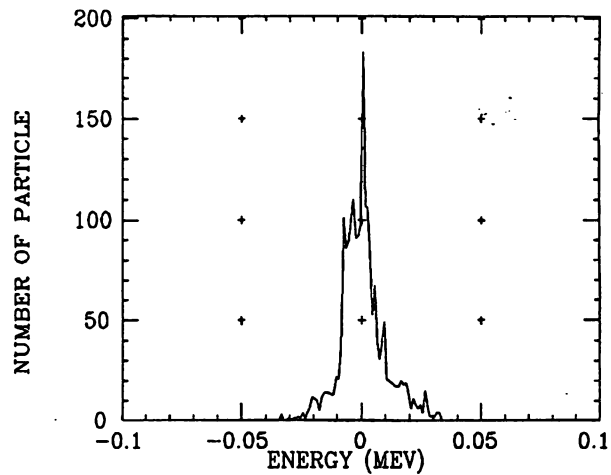


Fig. 24 Calculated energy distribution for a 300-mA beam at the DTL entrance. The buncher voltage is 25 kV.

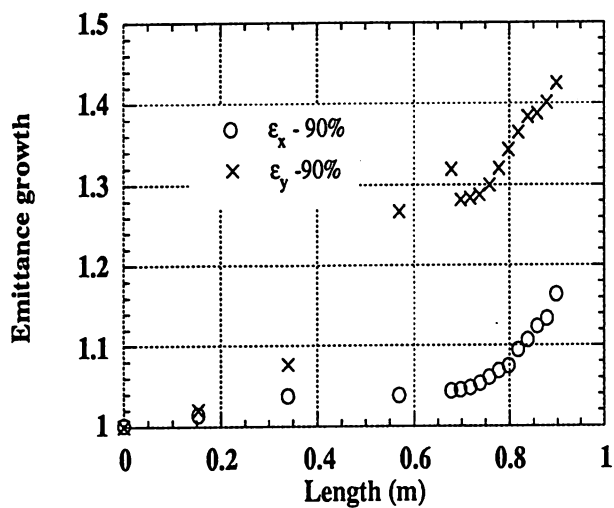


Fig. 23 Calculated emittance growth for a 200-mA beam with a normalized 90% emittance of $4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ versus drift length after the pre-buncher.