

偏向磁石通過後の強い空間電荷効果を持つ低エネルギービームパラメータ測定 (F5)

2001.8.22 T. Kato

まとめ

MEBT の偏向電磁石の後ろにおいて、どのようにしてビームパラメータが測定可能かをシミュレーションを用いて議論した。平均エネルギー、エネルギー幅、及び横エミッタンスはある程度の精度で測定可能と思われる。

1) はじめに

空間電荷効果が強い場合の低エネルギー陽子バンチビームの、セクター型偏向電磁石一台を通過後のビームパラメータの測定は、難しい問題を含んでいる。一台の偏向磁石では、その dispersion をゼロにする事は出来ないので、ビームの持つ運動量の広がり効果が大きくなり、精度の高いビームパラメータの測定は難しいと考えられている。統合計画の中間エネルギービーム輸送系 (MEBT, 3 MeV) においては、第一バンチャーとチョッパーの後ろに偏向電磁石があり、ビームを曲げた後で、ビームパラメータの測定と監視とをする予定である。この場合、一体どのような測定が期待出来るかについて、シミュレーション結果を基礎に、考察した。難しさを生みだす問題点は以下の2点と考えられる。

1. $\Delta p/p$ の効果

2. 空間電荷効果。

測定するビームパラメータは、平均ビーム電流、平均ビームエネルギー、エネルギー幅、横エミッタンスの4項目とする。実際に設置する測定システムは、平均ビーム電流測定及びスリット2枚を用いたエミッタンス測定ができる装置を想定する。

2) 統合計画 MEBT の概要

図1に MEBT の配置図、図2にビーム軌道 (Trace3D 出力) を示す。ビーム入口から 1.53 m の地点に偏向電磁石が置かれている。関連するパラメータを表1に示す。図2に示したビーム軌道はチョッパーの動作を最適化するように機器 (四極磁石、バンチャー) のパラメータがチューニングされている。これらの値は、偏向ビームラインでの測定にとっては、必ずしも最適な条件とは言えないので、偏向ビームラインを用いた測定を行う場合には、測定の最適化という目的のためにパラメータを変更する事が有用である。逆に、こうしたパラメータの変更を、測定の為の自由パラメータとして利用する事ができる。図3に偏向ビームラインのビーム軌道例を示す。

表1 偏向磁石に関連するパラメータ

回転半径	0.26282 m
回転角	45 degrees
3 MeV 時の磁場	0.950515 T
静止エネルギー	939.29432 MeV

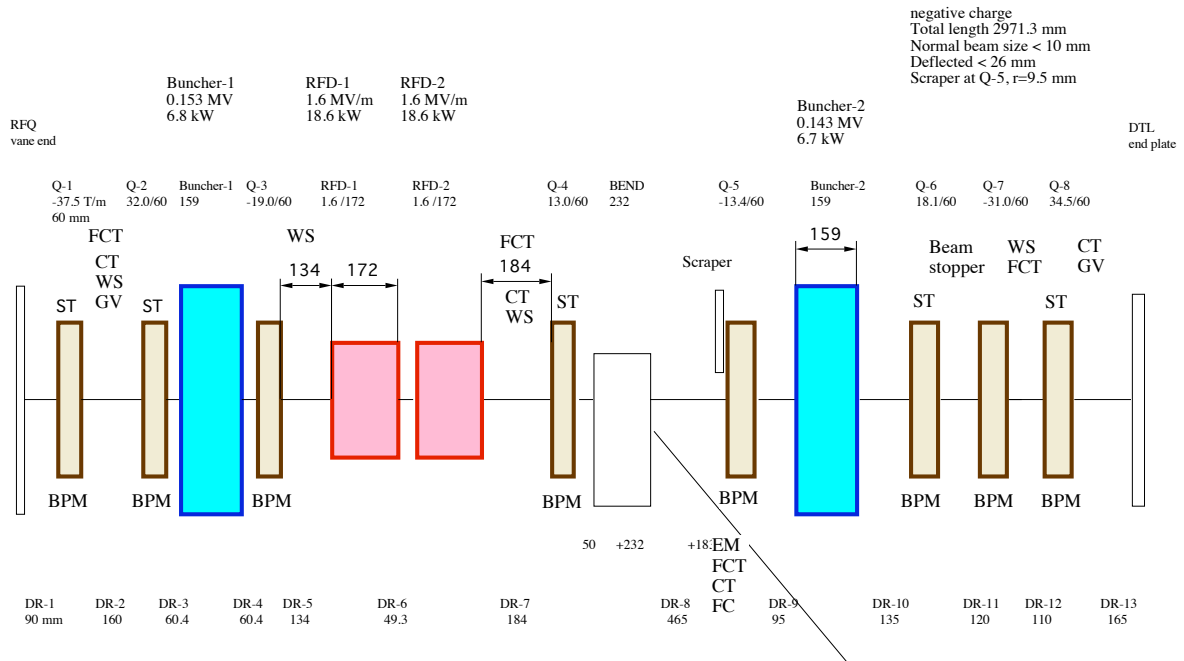


図1 MEBT 配置図

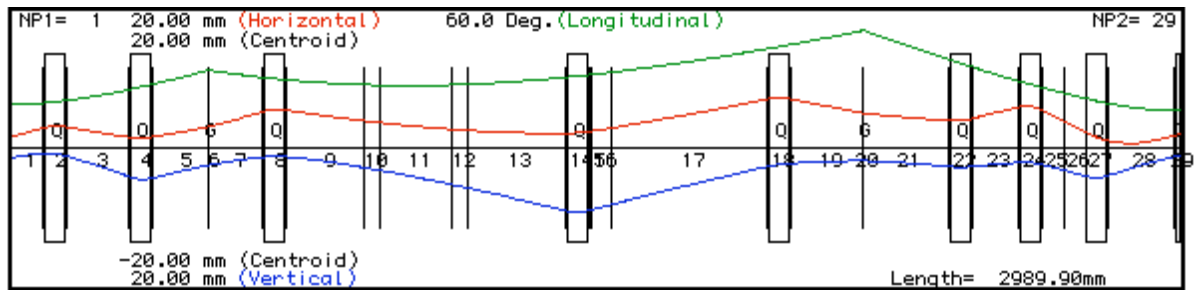


図2 MEBT ビームサイズ。赤-x、青-y、緑-z。

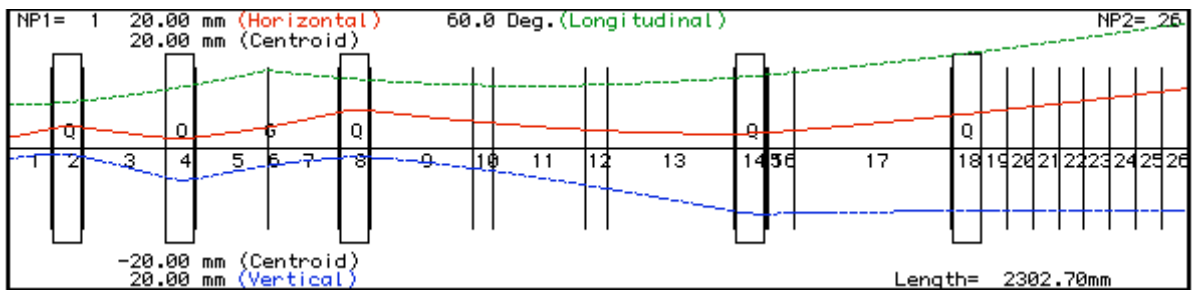


図3 偏向磁石をセグメント17に想定した時のビームサイズの例。Q18の磁場勾配はゼロとしている。

3) ビームシミュレーションコード

空間電荷効果を p-p 法で計算するビーム輸送系計算用コードである LEBT の中に偏向磁石を組み込んだ。本コードでは図 4 に示す配置 (drift space + bend magnet + drift space) を計算できる。コードには図 4 中に示した 3 個のスリットを組み入れている。新たに組み入れた入力パラメータを示す。

PRESLT VV(1); プレスリット

VV(1)= half-width of the pre-slit (m)

SLITX VV(1), VV(2), VV(3), VV(4); スリット

VV(1)=z-position of the first slit (m)

VV(2)= full-width of the first slit (m)

VV(3) = z-position of the second slit (m)

VV(4) = full-width of the second slit (m)

BEND VV(1), VV(2), VV(3), VV(4); 偏向磁石

VV(1)=design magnetic field (T),

VV(2) = bending angle (degrees)

VV(3) = operating magnetic field (T)

VV(4) = face-angle of the exit plane

注) 計算の都合から、スリットは z 軸に直角に設置している。従って、偏向後のビーム軸にたいしては、直角ではない。これは、スリット幅の実効的な減少と、左右のスリットのビーム進行方向に対する設置位置のずれを意味する。計算結果においては、スリットをわずかに高エネルギー側に偏って設置した効果と同等となり、スリットを通過するビームの平均エネルギーは、偏向磁石の磁場により決まるエネルギーよりも高くなる。これは、計算の本質的な結果には大きな影響を与えないと判断して、この部分のコード修正は将来の宿題とする (横エミタンス測定の時、修正済み)。図 5 に実際に設置する測定系を示す。

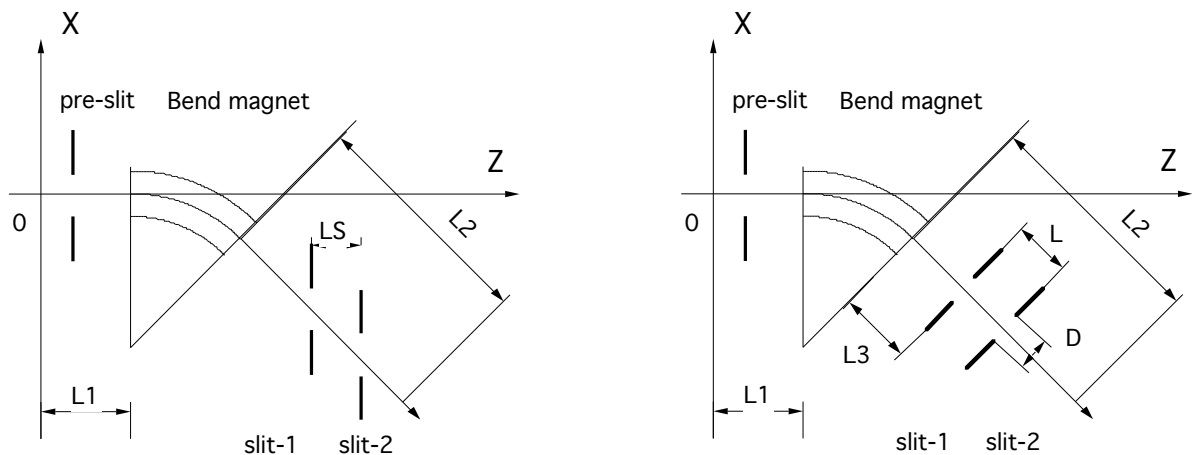


図4 シミュレーションで想定する偏向磁石システムとスリット。

図5 実際に設置予定の偏向磁石システムとスリット。

4) 計算結果

4) 計算結果 (空間電荷効果を含まない場合)

4-1) 入射ビーム

入射ビームパラメータを表2に示す。0mA と 30 mA の電流を仮定した。Rms 縦エミッタンスは 0.084 pi-MeV-deg を基準として、エミッタンスの大きさを変化させて、ビームのエネルギー幅を変化させた。この方法は電流ゼロの時の計算に使用した。粒子数 9600,3200,1200 を使用した。標準縦エミッタンスの入射ビームのエネルギー分布を図6に示す。Rms エネルギー幅は 11.5 keV である。

表2 入射ビームパラメータ

平均電流	0 or 30 mA
Rms 横エミッタンス	0.12 pi-mm-mrad
Rms 縦エミッタンス	0.084 pi-MeV-deg
Rms エネルギー幅	11.5 keV

4-2) 出力ビーム

電流ゼロの場合の出力ビームのエネルギー分布を図7に示す。磁場により粒子エネルギーはかわらないので、本図と図6とは、ほぼ同等である。

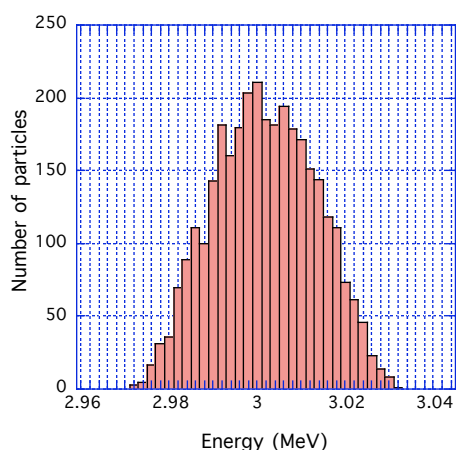


図6 入射ビームのエネルギー分布。

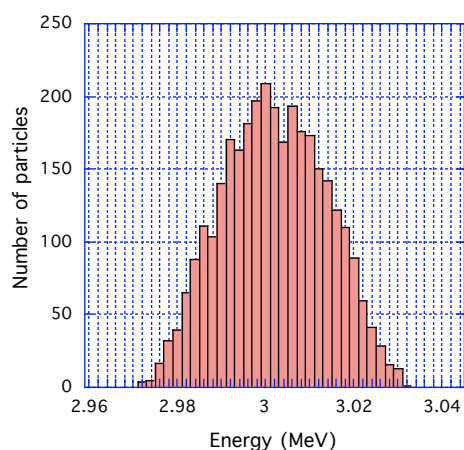


図7 出射ビームのエネルギー分布。

4-3) 磁場掃引によるエネルギー測定

偏向磁場を掃引してエネルギーを測定する方法がある。スリット等を何も使わず、ビームダクト径 (ここでは半径 3cm とした) により粒子が失われるとした時の結果を図8に示す (図に示した磁場の振り方では、ビームは壁にあたらない)。ここで測定量としては、平均ビーム電流を想定し、シミュレーション上では、通過する全粒子数とする。表示にあたり、透過粒子数が最大となる偏向磁場の時の粒子

数で規格化した。図7と8から判断すれば、(何も工夫しないで) 偏向磁石1台のシステムで平均エネルギーを測定する事は難しい。

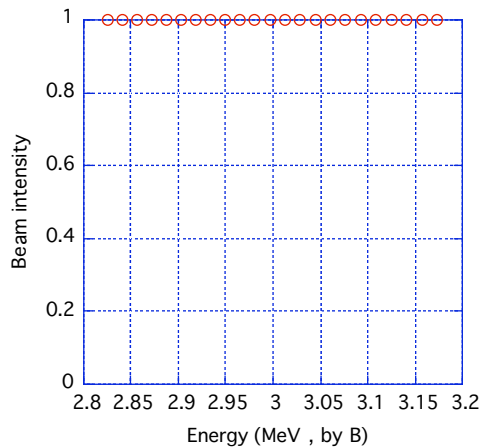


図8 磁場掃引時のビーム強度。スリットを用いない場合には、広い磁場範囲にわたり、ビームはすべて透過する。

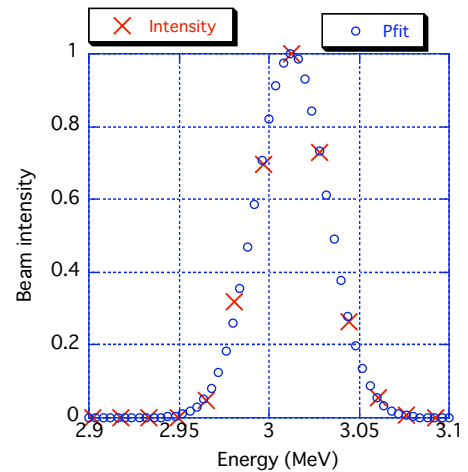


図9 スリット幅 0.5 mm、間隔 200mm の2枚のスリットを使用した時の、磁場掃引結果。赤のX印がシミュレーション結果、青丸はシミュレーション結果をもとに、gauss fitting した計算値。エネルギー幅は 19.8 keV。

4-4) スリットを用いたエネルギー測定

図5に示すような2枚のスリットを、ビーム電流測定系の前に設置すれば、エネルギーの分解能が上がるかと推定される。スリット間隔を L 、スリット全幅を D とすれば、偏向磁石通過後の粒子がスリットを通過できるためのエネルギー幅(Δw)は

$$\frac{\Delta w}{w} = \frac{2D}{L \sin \theta},$$

となる。 $D=0.5$ mm、 $L=200$ mm、 $\theta = 45$ degrees、 $w = 3$ MeV の時、 $\Delta w=21$ keV となる。このスリットを含む場合の磁場掃引結果を図9に示す。赤のクロスがシミュレーション結果、青丸は、シミュレーション結果を用いたガウス分布の fitting の結果である。Fitting から求めた rms エネルギー幅は 19.8 keV となるので、約 70%の過大評価となる。この場合最大ビーム強度は、入射電流の 19 % に減少する。シミュレーション上では磁場のステップは 0.26%としている。従って対応するエネルギーステップは 0.53% (16keV) となる。

4-5) 平均エネルギーの測定

前節と同じ測定条件下で、入射ビームの平均エネルギーを変化させて、磁場掃引法を行う。最大ピークビーム強度を与える偏向磁場の値 (fitting から求める) はビームの平均エネルギーに対応するとし、結果を図10に示す。ここでは入射ビームの平均エネルギーは 5 keV 毎に変化させた ($\Delta w/w =$

0.17%)。

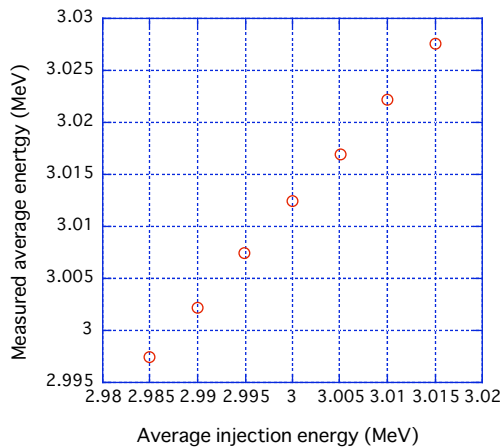


図 10 磁場掃引と fitting により求めた出力ビームの平均エネルギーと入射ビーム平均エネルギーの関係。

4-6) エネルギー幅の測定

スリットを用いて測定すれば、過大評価ではあるがエネルギー幅の測定ができる可能性がある。4-4 節と同じ測定システムで、入射ビームのエネルギー幅を変えて、それがどのように測定できるかを図 11 に示す。青クロスはスリット幅が 0.5mm の場合、赤丸は 0.1mm の場合である。スリットの幅を狭めると、エネルギー分解能は上がるが、透過粒子数が少なくなるので、測定の S/N 比の確保が重要となる。スリット幅 0.1 (0.5)mm の場合には最大透過粒子数は 1/1000(1/20)以下となる。例としてスリット 0.1mm、標準エミッタンスの時の fitting の様子を図 12 に示す。シミュレーションの粒子数は 9600 である。シミュレーションに限って言えば、使う粒子数を 10 倍にすれば、S/N 比は問題なくなると思われる。ここで磁場は、約 0.1%ステップで掃引した。実際の測定では、S/N を向上させるために、大きめのスリット幅を選らんでも、測定誤差を考慮すれば、有用な情報が得られる測定が可能と思われる。

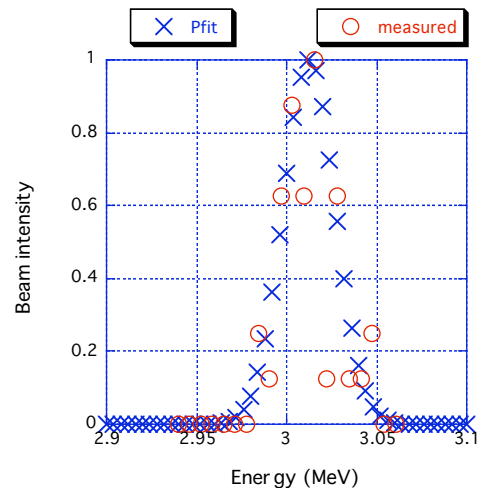
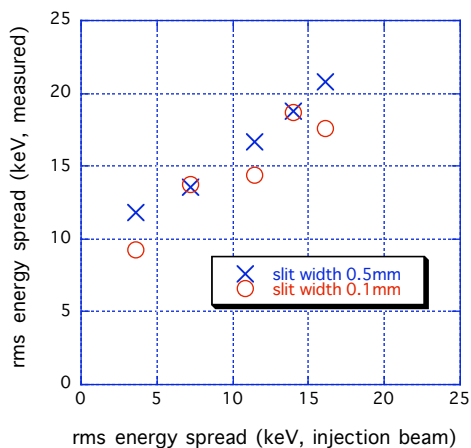


図 11 fitting により測定した出力ビーム rms エネルギー幅と入射ビーム rms エネルギー幅の関係。スリット幅 0.5mm、0.1mm の場合について示す。

図 12 スリット幅 0.1 mm の場合の測定と fitting 結果。エネルギー幅は 14.4 keV。

1 枚のスリットの場合の磁場掃引によるエネルギー幅測定結果を参考として図 13 に示す。

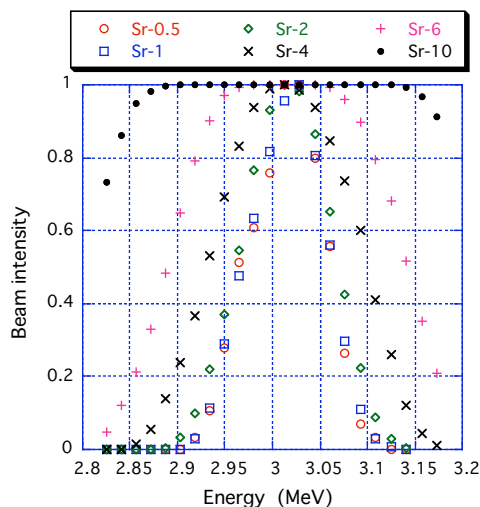


図 13 スリット 1 枚の時のエネルギー幅測定結果。Sr-2 はスリット幅 2mm を示す。標準縦エミッタンス使用。

5) 計算結果 (空間電荷効果を含む場合)

図 3 では、偏向ビームラインでの横方向ビームサイズの変化が小さくなるように四極磁石 Q14 をチューニングしている。空間電荷効果が大きくなるようなチューニングは望ましくないと思われる。空間電荷効果によりバンチの平均エネルギーは変化しない。しかしながら、エネルギー幅は大きく変化するので、この点が問題となる。

5-1) スリット 2 枚によるエネルギー幅計算結果

図 14 に、スリット幅 0.5mm の 2 枚のスリットを使った時の、電流 30mA の時の磁場掃引結果によるビームエネルギー幅を示す。スリット測定により得られた Rms エネルギー幅は 18.1 keV である。最大透過ビーム強度は、入射ビームの 5%に減少している。スリットを使わずに全ての粒子を通過させた時の出力ビームエネルギー幅は 20.2 keV となっている。入射ビームのエネルギー幅は 11 keV 程度だから、偏向ライン通過中に約 2 倍に幅が増加している。幅の変化の仕方はバンチャーの動作設定に依存する。従って、こうしたビームの振る舞いを理解した上で、測定したエネルギー幅の意味を考察すれば、空間電荷効果が強い場合にも、測定したエネルギー幅は、運転時のチューニングの要求を満たすものと思われる。

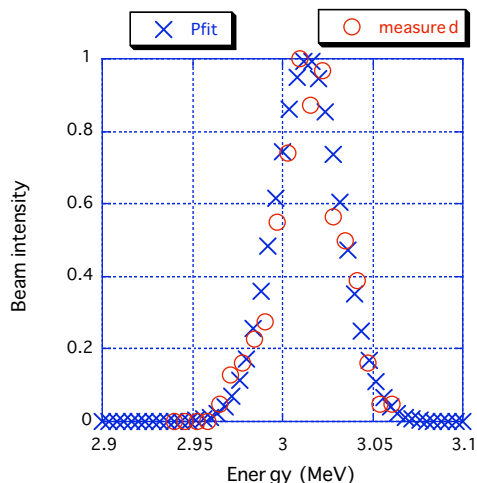


図 14 磁場掃引によるビームエネルギー幅の測定。
電流 30mA。得られたビーム幅は 18.1 keV。、実際の
幅は 20.2 keV。

5-2) 横エミッタンス測定

偏向磁石通過後の横エミッタンス測定が難しい
事は、ノート“MEBT 内の偏向磁石後のエミ

ッタンス測定(F4)”に記したが、様々な条件を考慮すれば、真の値が求められないという事ではない。
ここでは、図 5 のスリット 1 の位置を変化させて、その後スリット 2 の位置のビームのスリット測定
によりエミッタンスを求めるといふシミュレーションの結果について記す。計算は 9600 個の粒子を使
い、ビーム電流ゼロと 30mA の場合についての結果を以下に示す。スリット幅は 0.5mm とした。

5-2-1) 横エミッタンスの変化

表 3 に横エミッタンスの偏向ビームライン上でのシミュレーションによる計算値を示す。スリット 1
での値が、測定と比較する値となる。

表 3 偏向ビームラインでの横エミッタンスの値 (pi-mm-mrad)。

位置	0mA		30mA		0mA		30mA	
	x-rms	x-90%	x-rms	x-90%	y-rms	y-90%	y-rms	y-90%
入射	0.121	0.516	0.121	0.516	0.123	0.523	0.123	0.523
スリット 1	0.202	0.890	0.232	1.01	0.123	0.522	0.131	0.556
出射	0.202	0.892	0.216	0.954	0.123	0.522	0.151	0.659

5-2-2) エミッタンス測定

電流ゼロの場合：図 15 と 16 にスリット 1 の近傍での x-xd (粒子) 分布とスリット測定した x-xd 分布
を示す。電流 30mA の場合：図 17 と 18 にスリット 1 の近傍での x-xd (粒子) 分布とスリット測定し
た x-xd 分布を示す。表 4 にそれぞれの場合のエミッタンスの値を示す。表中、括弧内の数字は、粒子
分布と比べた時の増加率である。電流ゼロの場合のスリット測定エミッタンスは、粒子分布から求め
た場合のエミッタンス値よりも約 6-7%程度大きい値が得られている。電流 30mA の場合には、その差
は 8-9%程度となる。この差は空間電荷効果による寄与と推定される。偏向磁石による効果を受けない

(dp/p の寄与を含まない)値は、0.131 程度だから、スリット方式の測定により得られる値は、真の値よりも 92%程度大きい (x -rms)。

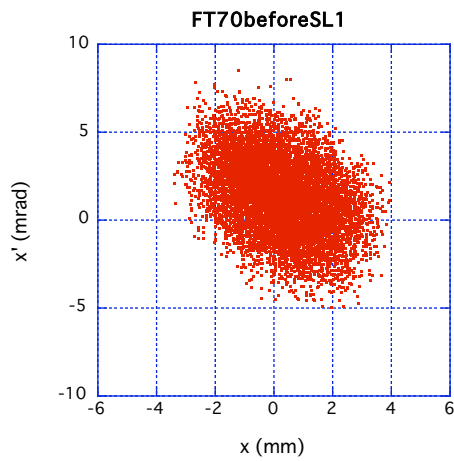


図 15 第一スリット位置の x - x_d ビーム分布 (電流ゼロ)。

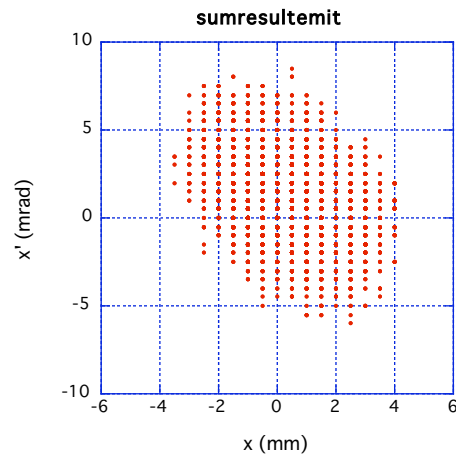


図 16 スリットによるエミッタンス測定結果 (電流ゼロ)。本図の 1 点は、実際には複数個の粒子 (チャンネル毎の電流値) を意味する。

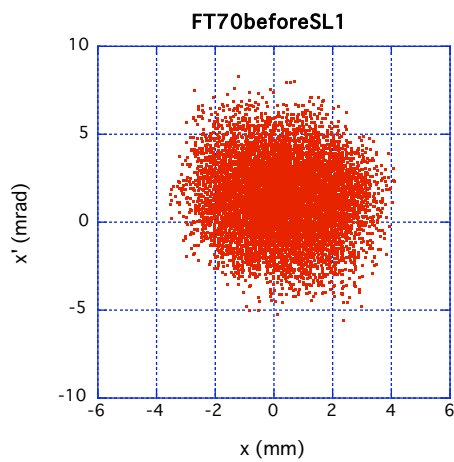


図 17 第一スリット位置の x - x_d ビーム分布 (電流 30mA)。

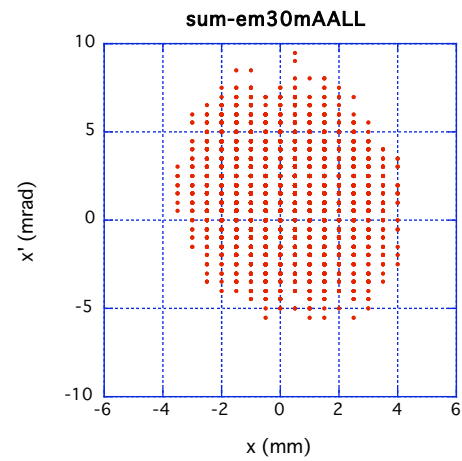


図 18 スリットによるエミッタンス測定結果 (電流 30mA)。本図の 1 点は、実際には複数個の粒子 (チャンネル毎の電流値) を意味する。

表 4 x - x_d エミッタンス値の比較 (単位 pi-mm-mrad)

	x -rms	x -90
電流ゼロ 分布から	0.202	0.890
電流ゼロ スリット測定	0.215 (+6.4%)	0.949 (+6.6%)
電流 30mA 分布から	0.232	1.01
電流 30mA スリット測定	0.251 (+8.2%)	1.10 (+8.9%)

5-2-3) エミッタンス測定値のエネルギー幅依存性

入射ビームのエネルギー幅を変化させると、磁場の効果を含まない時のエミッタンスを推定できる。ここでは twiss parameter を変化させて入射ビームのエネルギー幅を変える。バンチャー電圧を変化させれば、似た効果を実現できる。計算結果を図 19-20 に示す。電流値は 0mA および 30mA である。スリットによるエミッタンス測定値を入射ビームエネルギー幅に対して図示した。偏向磁場によるエミッタンス増加がエネルギー幅に比例すると仮定すれば、図より、エネルギー幅ゼロの時のエミッタンスは電流ゼロの場合に、0.48 となり、これは真の値よりも 8%小さい。電流 30mA の場合には、外挿値は 0.34 となり、これは真の値よりも 39%小さい。スリット測定により得られたエミッタンス値の補正の手続きについては、更に検討が必要と思われるが、ここでは、手順を示す事をテーマとした。

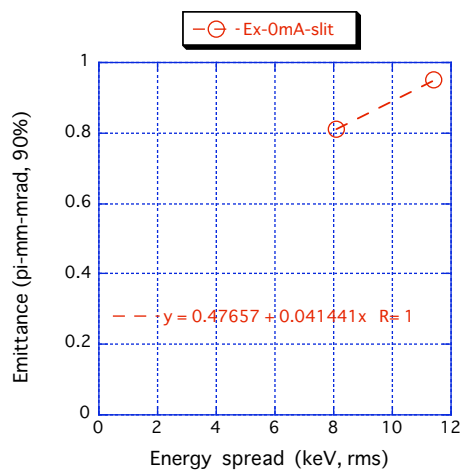


図 19 入射ビームのエネルギー幅を変化させた時の、スリット測定による x-xd エミッタンスと、dp/p 効果がないときの外挿(電流ゼロ)。

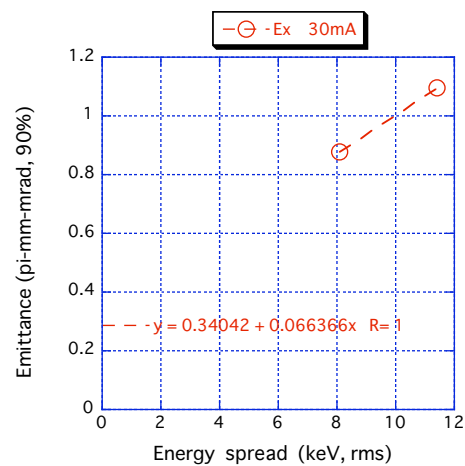


図 20 入射ビームのエネルギー幅を変化させた時の、スリット測定による x-xd エミッタンスと、dp/p 効果がないときの外挿(電流 30mA)。

6) 結論

エネルギー 3 MeV の空間電荷効果が強い偏向ビームラインにおいて、バンチビームの平均エネルギー、エネルギー幅、横エミッタンスの測定が、簡単な測定系においても、ある程度の精度で可能な事を示した。測定系としては、2 個のスリットを使うエミッタンスモニターと電流モニターを準備する。エネルギー測定用のスリットは、エミッタンスモニターのスリットを利用するのがよい。