

[F18p26]

## Study of a measurement of beam distribution on the phase space in the space charge dominant region

MASAHIRO Nomura

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation  
4002, Naritacho, Oaraimachi, Ibaraki, 311-13 JAPAN

### Abstract

I studied a method to measure the beam distribution on the phase space by magnetic lenses in the space charge dominant region. In this method, an initial beam distribution is figured by parameters such as a momentum spread, a waist position and a beam radius at the exit of gun instead of Twiss parameters. And the beam trajectory and radius are calculated by a new simulation code instead of transfer matrix because transfer matrix can not be used in the space charge dominant region.

I developed a new one dimensional simulation code. In this code, when the space charge force is calculated, a mesh size is changed automatically according to the beam radius in order to reduce the calculation error. The relations between the beam radius and strength of the magnetic lenses were calculated by this simulation code. The results show that the waist position and the beam radius at the exit of gun can be estimated from those relations.

### 空間電荷効果領域における位相空間上でのビーム分布測定の研究

#### 1. 序

現在事業団で開発中の大強度電子線形加速器は、平均電流が20 mAと非常に高い為漏れビームを極力押さえ無ければならない。更に、後方からの散乱を押さえる為に電子銃と加速部の間に2.3mのしゃへい壁があり、低エネルギー領域でのビーム輸送が長いことなどから通常の加速器以上にビーム輸送を正確に行わなければならない。そのためには、輸送するビームの初期状態、つまり電子銃出口の位相空間上でのビーム分布を知る必要がある。

空間電荷効果領域ではペーパーポッド法でエミッタンスの測定が行われているが、この方法では測定系をビームライン上に設置する為実際に使用しているビームを直接測定することはできない。そこで、高エネルギー領域における四重極電磁石を用いた方法を空間電荷効果領域まで拡張し、磁場レンズを用いた測定の検討を行ったのでその結果について報告を行う。

#### 2. 空間電荷効果領域におけるビーム分布測定

空間電荷効果領域における位相空間上でのビーム分布の測定は、高エネルギー領域における測定とは違う。先ず第1点目は、空間電荷効果(非線形)が働く為、線形の輸送行列 $M$ を用いて運動を記述できないことである。また、第2点目は、位相空間上でのビーム分布を楕円で近似できないことである。

る。ビームが磁場による輸送系やRFによるバンチング等により位相空間上で回転させられた後ではビームは空間的にも、角度的にもガウス分布に近くなり、位相空間上での分布は楕円で近似できるようになる。しかし、電子銃出口では陰極の表面状態や温度、グリッド電圧、加速電場等により決められた角度方向の分布となる。このことは、電子銃出口のビームの像がはっきりしていることから明らかである。これら2点の違いについては以下の方法で対処した。

先ず線形の輸送行列 $M$ が使用できない点については、シミュレーションを行うことにより対処した。しかし、シミュレーションで実験値と対応させることにより位相空間上でのビーム分布を求める場合には、条件を変えてシミュレーションを行い、その結果と実験結果を比較し、それらの結果が同じ場合にはその条件が正しいと言うやり方になる。そこでシミュレーションを用いる場合にはその回数が多くなる為1回のシミュレーション時間を短くしなければならない。

次に、位相空間上でのビームの分布を楕円で近似できない点については以下の様に対処した。先ず、陰極から引き出された直後の電子ビームの分布は、空間的には軸対称で一様分布、角度方向には熱分布や表面状態からガウス分布で近似できると考えられる。陰極の大きさは分かっているが、角度方向の拡がりパラメータの一つとなる。そ

の後電子ビームは電子銃内での電場により発散を押さえられ加速される。EGUNを用いて計算した結果、電子銃出口約10 cmにウエストが位置するように電子銃は設計されている。そこで、電子銃出口のビームの分布は、陰極直後の分布が何らかの収束力を受け、ある距離を走ったと考えて輸送行列 $M$ を用いて計算した。実際に使用したパラメータは、現実の物理量との対応を良くする為に収束力と距離から求めたビームウエストの位置と電子銃出口でのビーム径を用いた。

### 3. シミュレーションコード

シミュレーションにおいて最も重要なことは計算速度である。そこで、計算時間短縮の為に今回は二つの方法を採用した。一つは、空間の対称性を利用し、計算する電子数を大幅に減らしたことである。つまりビームが軸対称であることを仮定し円筒座標 $(z, r, \theta)$ を用いて、空間電荷による発散力を求める時には $z$ 方向と $\theta$ 方向に関して積分を行った。このことは物理的には、電子ビームを無限に長い円環の集合体であると近似したことになる。具体的な計算方法を以下に示す。

無限に長い直線上に電子が分布している場合、 $r$ だけ離れた位置での電場 $E_r$ は、

$$E_r = \frac{N_e e}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (1)$$

で表される。 $N_e$ は単位長さ当たりの電子の個数、 $e$ は電子の電荷を表し、 $\epsilon_0$ は真空での誘電率を表す。また、磁場による収束力も働くので動径方向の運動方程式は、

$$m_0 \gamma^i \ddot{r} = \frac{N_e e^2}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{\gamma^2} \quad (2)$$

で表される。次に式(2)を用いると、 $r_k$ の位置の電子が半径 $r_i$ の円環から受ける力による動径方向の運動方程式は、

$$m_0 \gamma^i \ddot{r}_{ki} = \frac{e}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q_i}{2\pi r_i} \frac{1}{\gamma^2} \times \int_0^{2\pi} \frac{r_k - r_i \cos\theta}{r_k^2 + r_i^2 - 2r_k r_i \cos\theta} r_i d\theta \quad (3)$$

となる。ここで $Q_i$ は円環 $i$ の電荷を表す。式(3)は解析的に積分することは難しく数値積分を行わなければならない。シミュレーションを行う時にはこ

の積分は各時間ステップ毎に行わなければならない、計算時間の大部分を占めてしまう。そこで、計算時間短縮の為のもう一つの方法として、空間を分割し各点での運動方程式、つまり式(3)を予め計算しておき、各計算ステップでは単にその計算結果を引き出すようにした。式(3)で実際に予め計算しておきストックしておくのは後半部分 $F(k,i)$ 、

$$F(k, i) = \sum_{m=1}^{Int[2\pi n_i]} \frac{n_k - n_i \cos\left(\frac{2\pi m}{Int[2\pi n_i]}\right)}{n_k^2 + n_i^2 - 2n_k n_i \cos\left(\frac{2\pi m}{Int[2\pi n_i]}\right)} \quad (4)$$

だけである。式(4)で注目すべき点は、 $F(k,i)$ はメッシュサイズには依存せず、予め $F(k,i)$ を計算しておいてもメッシュサイズは条件に応じて変えることができる点である。これは初期の計算条件の違いだけでなく、計算途中で例えばビーム径が大きく変化した場合でも適用でき、飛躍的に計算精度を上げることができる。今回は、ビーム径の変化によりメッシュサイズが自動的に変化するようにした。一般に広く使用されているPARMELAとは決定的に違う点である。

### 4. 計算結果及び議論

この章では今まで述べてきた方法について計算結果を交えて具体的に説明し、その有効性を議論する。先に述べた様に電子銃出口の位相空間上でのビームの分布は、角度方向の拡がり、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径で近似的に記述する。角度方向の拡がりについては電子銃出口から約80cm離れたプロファイルモニター上でメッシュグリッドのサポートの像が見えることから非常に小さな値と考えられる。そこで今回はパラメータの数を減らす為に、角度方向の拡がりを表すガウス分布の分散 $\sigma$ の値を1mradに固定し、ビーム径はエミッタンスによりほとんど影響を受けないと仮定した。よって今回の計算でのパラメータはビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径の2つとした。

先ず初めに図1に計算体系を示す、この体系は、現在開発中の加速器の入射部の体系を基にしたものである。次に、初期のビーム分布を記述するビームウエストの位置 $l$ 及び電子銃出口でのビーム径 $r_0$ をパラメータとした時のプロファイル1上でのビーム径 $r$ と磁場レンズ2の強度 $B$ との関係を図2、3に示す。図2と3を比較すると磁場の変化に対するプロファイル1上でのビーム径の変化の仕方がビームウエストの位置が違う場合と電子銃出口でのビーム径が違う場合とでは変化の仕方に差があ

り、2つのパラメータ、ビームウエストの位置と電子銃出口でのビーム径をそれぞれ求めることができると思われる。

プロファイルモニタ1

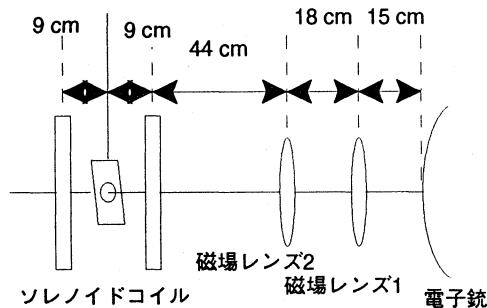


図1 計算体系

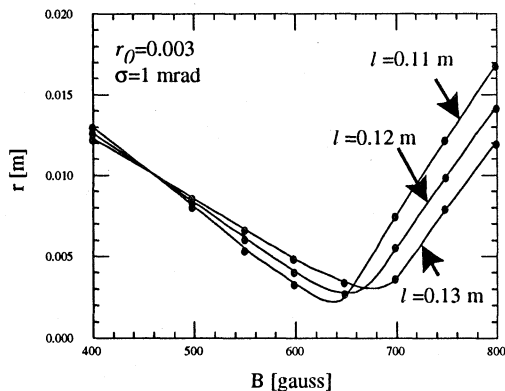


図2 ビーム径と磁場強度

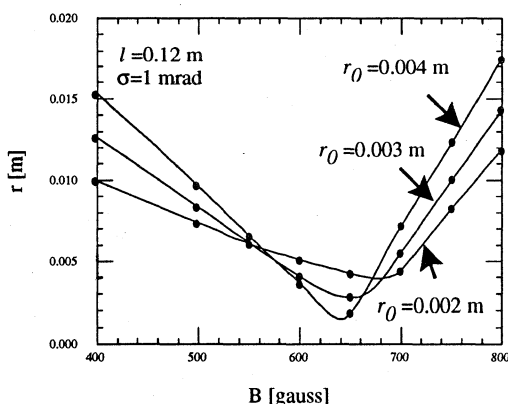


図3 ビーム径と磁場強度

また、これらの図より、測定精度が1mm程度だと

すると、ビームウエストの位置を1cm程度、電子銃出口でのビーム径を1mm程度の範囲で決定できると考えられる。

## 5. まとめ

高エネルギー領域で四重極電磁石を用いて位相空間上でのビームの分布を測定した方法を空間電荷効果領域まで拡張して、磁場レンズを用いてビームの分布を測定する方法の研究を行った。この方法では、Twiss パラメータで位相空間上でのビームの分布を近似する代わりに、角度方向の拡がり、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径で初期の位相空間上でのビームの分布を近似し、輸送行列Mを用いる代わりに、運動の記述をシミュレーションにより行った。

これにともない、計算速度を最優先した1次元のシミュレーションコードを開発した。このシミュレーションコードではメッシュサイズを変化させることにより空間電荷効果を非常に精度よく取り込めるようにした。また、このシミュレーションコードを用いてビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径の違いにより生じる磁場レンズの強度とビーム径の関係の違いを計算し、この関係から初期の位相空間上でのビームの分布をある程度決定できることを確認した。

今後は実際に磁場レンズの強度を変えて、その時のプロファイル上でのビーム径を測定し計算と比較する必要がある。また、更にこの方法を拡張し、ソレノイドコイルを用いてチョッパー空胴前後でのエミッタンスの増加の測定も行っていく予定である。

## 謝辞

本研究を行うにあたり加速器の運転に携わった加速器グループのメンバー全員に感謝致します。特に、有益な議論をしてくれた、山崎良雄氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] X.J.Wang *et. al.* : Proc. of 1993 PAC
- [2] Y.Yamazaki *et. al.* : Nucl. Instr. and Meth. A322(1992)139
- [3] 菅原 真澄 : 講義ノート