

# HOW TO SUPPRESS THE EMITTANCE GROWTH AT THE PRE-INJECTOR OF A LINEAR ACCELERATOR

Ryuichi MATSUDA\* , Hitoshi KOBAYASHI<sup>†</sup> , Atsushi ENOMOTO<sup>†</sup> and Isamu SATOH<sup>†</sup>

\*Takasago R & D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

2-1-1, Shinhamma, Arai-cho, Takasago City, Hyogo Pref. 676

<sup>†</sup>National Laboratory for High Energy Physics(KEK)

1-1, Oho, Tsukuba City, Ibaragi Pref. 305

## ABSTRACT

A high-brightness, high-current and low-emittance electron beam is required for advanced applications of accelerators, such as high power and short wavelength free electron lasers. Since normalized beam emittance is not damped in a linac, both generation of a low emittance beam and acceleration of a low emittance beam without emittance growth are important. A high-brightness electron-gun under development at the KEK Test Linac addresses the former goal and this study, how to suppress the emittance growth at the pre-injector, addresses the latter. Simulation by PARMELA shows that emittance growth is strongly affected by beam size at each key component, such as the pre-buncher and the buncher. A new magnetic field distribution of focussing coils which yields small emittance growth rate is also discussed.

## 電子線形加速器入射部におけるエミッタンス増加とその抑制

### 1. はじめに

近年、電子ビームの高輝度化が望まれており、特に短波長の自由電子レーザーの発振には、従来の加速器に比べて1～2桁以上の高輝度電子ビームが必要であるといわれている。電子ビームの輝度を上げるには電流量を多く、しかもエミッタンスを小さくする必要があるが、特に加速器入射部では空間電荷効果及びバンチャでの径方向の電場により、エミッタンスが増加する傾向にある。<sup>1)</sup>

KEKテストライナックでは高輝度電子加速器を目標に開発が進められており、順次電子銃、マグネチックレンズ、フォーカスコイル、バンチャ系での電子ビームの挙動を計測し、高輝度化の検討を行っていく予定であり、現在、高輝度電子銃を開発し、そこでの高精度のエミッタンス計測を行っている。<sup>2)</sup>

本研究では、エミッタンス増加が特に多いといわれているバンチャ系での電子ビームの挙動から、フォーカスコイルの磁場の制御によるエミッタンス増加の抑制方法を導いた。この方法に従い、KEKテストライナックをモデルとしたシミュレーションを行い、エミッタンス増加を抑制できることを確認した。その方法及びシミュレーション結果について報告する。

### 2. エミッタンス増加の抑制

加速器入射部における主なエミッタンス増加原因は、

i)空間電荷効果

ii)バンチャ内径方向電場

による電子ビームの発散である。

i) 空間電荷効果によるエミッタンス増加はその電荷密度の大きさと分布に大きく影響される。均一

分布での空間電荷力はビーム半径  $r$  に比例し、エミッタンスの増加はない。しかし電荷の分布がガウシアンやホローの場合では、一般に電子のプラズマ波長の約 1/4 程度の距離を進むうちに、空間電荷のエネルギーがエミッタンスの増加に変換され、他条件の影響もあるが、一般の電子線形加速器に用いられている条件では、たちまち数倍程度に増加するといわれている。<sup>3)</sup> この空間電荷分布によるエミッタンス増加に関して、今後テストライナックを用いて詳細に実験される予定であるが、本研究ではエミッタンス増加が比較的小さいといわれる均一分布を仮定する。テストライナックの電子銃では、ここで仮定するエミッタンスとビーム電流がほぼ得られている。<sup>4)</sup> 本研究ではこのようなビームをブリリアンフローに近い条件で輸送する。この条件としては、磁場の影響がなくフォーカスコイルの軸上にある一様電子ビームが、コイルによる磁場中に入射したときに次式を満たすことが必要となる。

$$B_b = 0.369 \times 10^{-4} \frac{1}{r} \sqrt{\frac{I}{\beta\gamma}} \quad [\text{T}] \quad (1)$$

ここで、 $B_b$  はブリリアンフローするための磁場、 $r$  はビーム半径[m]、 $I$  はビーム電流[A]、 $\beta$  は光速  $c$  に対する電子ビーム速度  $v_e$  の比 ( $v_e/c$ )、 $\gamma$  はローレンツファクタ ( $1/\sqrt{1-\beta^2}$ ) である。特に電子ビームがバンチャ等に入射したときには、バンチャされることによって電流  $I$  が変化し、さらに加速されることにより  $\beta\gamma$  が変化するため、ブリリアンフローさせてビーム径  $r$  を保つためには、この変化に従ってフォーカスコイルの磁場を変化させることが必要である。

ii) は進行波型のバンチャを用いたときに、軸方向の加速電場と位相が  $\pi/2$  だけずれた半径方向の電場によるもので、しかもこの発散力  $F_r$  は半径  $r$  に比例して大きくなる。式で書くと、

$$F_r = a \cos \theta \quad (2)$$

で、ここで  $a$  は係数、 $\theta$  は高周波電場に対する電子の位相である。係数  $a$  は電子ビームが光速に近づくほど 0 に近づくため、発散力はバンチャ入口付近で最も強く働く。また通常電子は位相  $60^\circ$  付近に分布している。従って式 (2) に示すように、電場による半径方向の力も高次の項を無視すればリニアな力となり、エミッタンスは増加しないはずである。しかし各電子の位相  $\theta$  が異なるため発散力  $F_r$  も異なるので、図 1 (a) に示す様なエミッタンスは回転角が異なるため、図 1 (b) に示す様ないわゆるバタフライ状のエミッタンスとなる。即ち時間的に積分したエミッタンスは増加する。

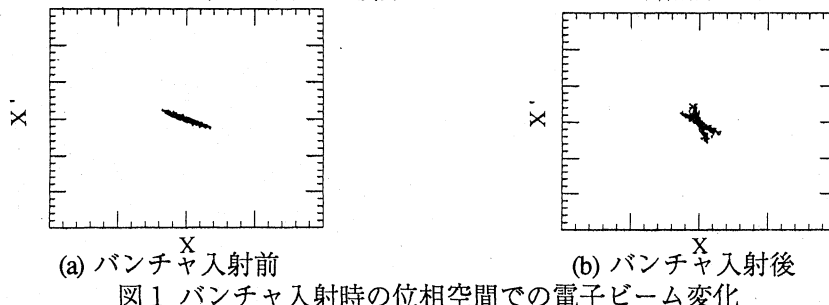


図 1 バンチャ入射時の位相空間での電子ビーム変化

以上のことを考えながら、エミッタンス増加を如何に抑えるかを考えてみた。まずブリリアンフローさせるための磁場  $B_b$  に近い磁場  $B$  をフォーカスコイルで再現する。このときバンチャ等に電子ビームが入射した場合は電流  $I$  や  $\beta\gamma$  が変化するので、シミュレーションにより推定するか、たとえば電流値はファラデーカップ等で実測し、その結果から  $B_b$  を導く。次にバンチャ入口での電場による発散力の影響を如何に抑えるかについては、式 (2) の結果から導かれるように、ビーム径  $r$  を細くする。しかしビーム径を無限に細くするにはフォーカスコイルの磁場を無限に大きくする必要があり、限界がある。そこで磁場を少し変化させてビームをうねらせ、一時的にビームが細くなったときにバンチャに入射させる。このときバンチャ内で電子ビームは加速されるが、発散力  $F_r$  が十分小さくなるまでに、電子ビームは少し進むので、電子ビームが最も細くなる位置よりも手前にバンチャ入口があるように、フォーカスコイルの磁場  $B$  を調節するとよい。こうすることによってエミッタンス増加を抑制できると思われる。

### 3. シミュレーション

実際に実験を行う前に、前述の方法をKEKテストライナック入射部（特にプリバンチャ手前からバンチャ半ば）をモデルとしてシミュレーションを行ってみた。シミュレーションには電子軌道解析コードPARMELAを用いた。PARMELAでは電子ビームを1000個程度の粒子とみなし、空間電荷効果及び進行波管内の電磁場、フォーカスコイルの磁場等により、その粒子がどのような運動をするかを計算でき、本研究の解析に最適である。

プリバンチャ手前での電子ビーム特性を表1に示す。電流値はSHBを用いることを想定し、多めにしている。ビーム径及びエミッタンスは現在テストライナックで研究が続けられている高輝度電子銃の結果<sup>2)</sup>を基に、マグネチックレンズ、SHBの影響を考慮し多少ファクタをかけている。プリバンチャ、バンチャはKEK陽電子用加速器と同じものである。

これにまず電子ビームが発散しない十分な磁場をかけ、電子ビームを入射し、任意の位置での電流、エネルギーを求めた。この結果を式(1)に代入し、磁場を求めた。この値をプロットすると図2の丸印となる。この印を目標にしてバンチャの入口でビーム径が小さくなるように、フォーカスコイルの磁場を設定した。

このようにして行ったシミュレーション結果を以下に示す。図2の実線はフォーカスコイルの磁場を表す。またその時の電子ビーム軌道を図3に示す。図3には任意の位置での規格化rmsエミッタンスも示した。プリバンチャ手前とバンチャ半ばでのエミッタンスを比較すると約1.5倍程度にエミッタンス増加が抑えられていることがわかる。

図2  
ビーム軸上の磁場分布

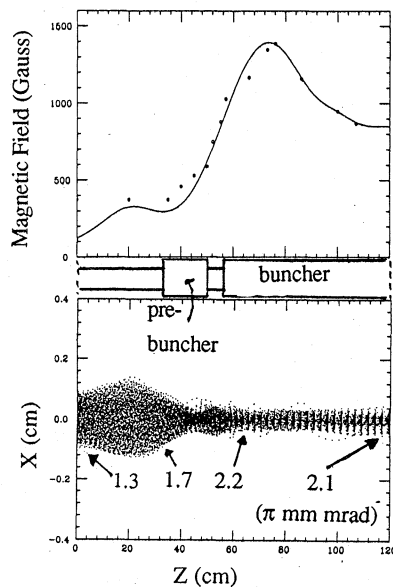


図3  
電子ビーム軌道(RFの1/2  
周期毎にプロット)と規格  
化rmsエミッタンス

表1 入射電子ビーム特性

|                   |            |
|-------------------|------------|
| 平均電流 $I_{ave}$    | 1A         |
| エミッタンス $\epsilon$ | 2π mm mrad |
| ビーム半径 r           | 1 mm       |
| エネルギー E           | 200 keV    |

(ここでのエミッタンスは位相空間で電子ビームが占める面積。rmsエミッタンスは1.3 π mm mradであった。)

### 4. 結論

エミッタンスはその性質上小さくすることは困難なので、初期値をいかに小さくするか、またいかに増加させないかが重要である。本研究で後者の検討を行ったところ、シミュレーション結果ではあるが、通常3倍から10倍以上といわれているエミッタンス増加の割合を、フォーカスコイルの磁場を制御することにより、その1/2から1/6以下に抑えることができるという結果を得た。

KEKテストライナックでは上の前者、即ち電子銃の研究開発が進められており、今後は本研究の結果を後者の研究開発に反映させ、高輝度電子加速器を開発していく予定である。

### 参考文献

- 1) Charles H. Kim, DE-AC03-76SF00098
- 2) Y. Yamazaki et al., Nucl. Instrum. Meth. in press
- 3) T.P. Wangler, IEEE Trans. on NS, Vol. NS-32, No.5 (1985) p.2196-2000
- 4) Y. Yamazaki et al., this meeting.