

FOCUSING EFFECTS OF THE S-BAND ACCELERATOR STRUCTURE

Akihiko Mizuno*, Takao Asaka, Hideki Dewa, Toshiaki Kobayashi, Shinsuke Suzuki,
Tsutomu Taniuchi, Hiromitsu Tomizawa, Kenichi Yanagida, Hirofumi Hanaki
Japan Synchrotron Radiation Research Institute/SPring-8
1-1-1 Koto, Mikazuki, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

Focusing effects of the S-band traveling wave accelerator structure were numerically investigated. These results indicate that low energy electrons of about 10 MeV are strongly focused. These effects are caused by not normal cells of the structure but the first cell. The focusing effects depends on transverse shifts of electron beam at the entrance of the structure, which produce coma aberrations. Now in the SPring-8, focusing effects were not able to measured preciously, but the coma aberrations could be measured. More precious experiments are required.

S バンド加速管におけるビーム収束効果について

1. はじめに

電子線型加速器において、通常、電子バンチは RF 加速電界のクレストに載せる。この場合、加速管のセル中心では、電子は transverse 方向の力を受けない。セルの両端においては transverse 方向に力を受けるが、全てのセルが同一形状であるとする、電子がセルの入口と出口で受ける運動量はお互いにキャンセルされ、全体の平均をとると transverse 方向の運動量は変化しないだろうと理解される。したがって、加速管による電子の収束効果については詳しく議論されていない現状がある。ただし、加速管中では、電子は longitudinal 方向に運動量を受けるため、加速管の前に四極電磁石においてビームを収束したとすれば、その焦点距離は引き伸ばされる。この効果を反映した加速管中の転送行列は、以下で与えられる。

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{E_0}{eE_{acc}} \ln \left(1 + \frac{eE_{acc}z}{E_0} \right) \\ 0 & \frac{E_0}{E_0 + eE_{acc}z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 z は加速管入口からの距離、 E_0 は加速管に入射される電子の全エネルギー、 E_{acc} は加速管中心軸上の平均電界である。

SPring-8 線型加速器では、ビームエネルギー安定化と共にシングルパス BPM による軌道 feedback が実用化され、非常に再現性の良いビームオペレーションが実現しているが、四極電磁石の自動調整は実現していない。これを行うために (1) 式を含むマトリクス計算によってビーム軌道を確定しようと試みたが、低エネルギー部分では、観測されるビーム軌道と一致しないことが分かった。計算に考慮されていなかった効果として加速管での収束効果が考えられるため、粒子トラッキングコードを用いて SPring-8 の S バンド進行波型加速管において検討した。

2. トラッキングコード

計算は、SPring-8 での RFgun 研究用に開発した、自作のマクロ粒子法による 3 次元トラッキングコード^[1]に、POISSON SUPERFISH で計算した加速管の電磁界を組み込んで行った。

SPring-8 では $2/3\pi$ モードを用いているため、加速管内電磁場は 1 波長の半分の 1.5 セル分について、両端 Neumann Boundary、両端 Dirichlet Boundary の場合それぞれを計算する (図 1 上)。この 2 つの状態は、ちょうど位相が 90 度ずれているために、任意の時間における電磁場は、Neumann 条件のデータを $N(z)_{Elec}$ 、 $N(z)_{Mag}$ 、Dirichlet 条件のもの

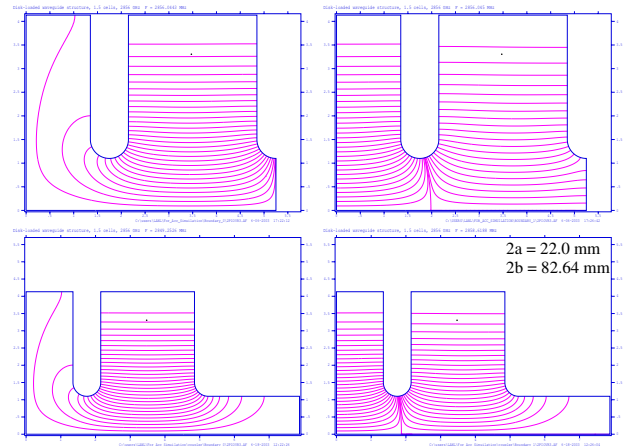


図 1: POISSON SUPERFISH で計算した加速管内電場。左上：ノーマルセクション Neumann Boundary、右上：ノーマルセクション Dirichlet Boundary、左下：入出力カップラ Neumann Boundary、右下：入出力カップラ Dirichlet Boundary。

* E-mail: mizuno@spring8.or.jp

を $D(z)_{Elec}$ 、 $D(z)_{Mag}$ とすれば

$$\begin{cases} E_z = N_{Elec}(z) \cos(\omega t) - D_{Elec}(z) \sin(\omega t) \\ H_\theta = N_{Mag}(z) \sin(\omega t) + D_{Mag}(z) \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

で表すことができる。入出力カップラ部分は形状が異なるが、同様に電磁場を求めることができ(図1下)、これらを組み合わせることで加速管内のトラッキングを行うことができる。

3. Sバンド加速管の収束効果

前項で説明したトラッキングコードを用いて、1個の電子が加速管に進入したときの電子の軌道を計算した。電子、および加速管のエネルギーは、SPRING-8線型加速器の最上流部加速管を模擬した。すなわち、入射電子のエネルギーは10 MeVとし、加速管のエネルギーゲインは50 MeVとした。電子は、加速管中心軸から r 方向に10 mmシフトした位置で、中心軸に平行に加速管に進入するとし、また、RF電界のクレストに位置するものとした。図2に、この場合の電子軌道を示す。加速管長は約3mであり、加速管に入ると同時に急激に収束されているのが分かる。

加速管のどの部分で収束効果が起こるのかを考察する。電子がRF電界のクレストに載っているとす。加速管が無限長であると仮定し、電子があるセルの中心に位置している場合、電子にはtransverse方向に力が作用しない。しかし、セルの入口に位置している場合には、RF電界のクレストに位置しないため B_θ 、 E_r を感じ、これらは収束力となって電子に働く。同様に、セルの出口に電子が位置している場合、これらは発散力となって働く。各セルは幾何学的に対称であるから、これら収束力と発散力は等しいが、この間に電子は若干加速されるので、収束効果の方が大きくなる。これを数値的に確かめる。

収束 or 発散効果は、電子の運動方程式より、直角座標系において次のように導かれる。

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\gamma} \frac{e}{m_0} \left(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E} - \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{E})}{c^2} \mathbf{v} \right) \quad (3)$$

(3) 式が電子の運動方程式である。これより、加速

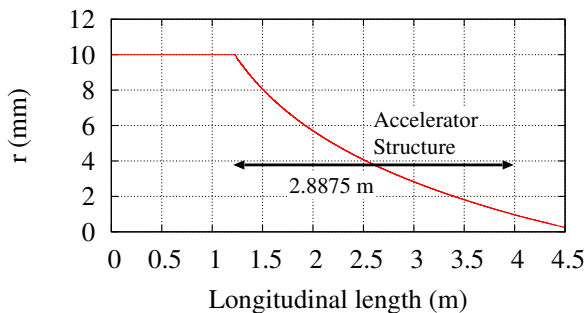


図2: 10 MeV の1個の電子が Gain 50 MeV の加速管によって収束される様子。

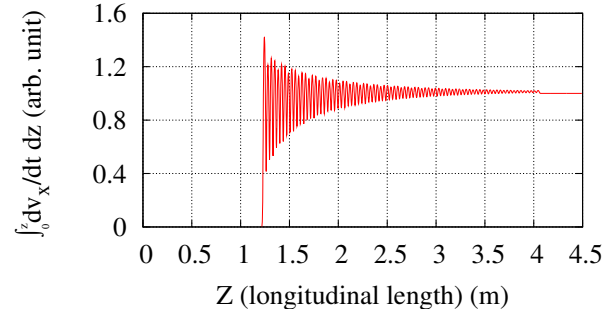


図3: 加速管中の各位置において、電子が受ける速度変化を加速管入口から積分したものを規格化して示している。この例では、収束力は、ほぼ加速管の入力カップラセル部分にのみ存在するのがわかる。

管の電磁場 E_x 、 B_y が、 z 方向に進む電子に対し x 方向に及ぼす速度変化は、以下のように表される。

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{\gamma} \frac{e}{m_0} (-v_z B_y + E_x) \quad (4)$$

トラッキングコードで加速管中の電子をトラッキングする際、電子が各位置において受ける dv_x/dt の値を出力させることができる。図2の例において、加速管入口から電子の位置までに電子が受けた dv_x/dt の和、 $\int_0^z \frac{dv_x}{dt} dz$ を各位置毎にプロットし、図3に示した。

図3でこの値が振動しているということは、各セルの入口出口で収束発散を交互に繰り返していることを示している。しかし、一定値を中心に振動しており、加速管のノーマルセルの部分では1セル分のエネルギー増加があるものの、ほぼ収束、発散効果が平均としてキャンセルされていることを示している。これに対し、加速管の入力カップラセル部分では急激に立ち上がっており、この部分において強い収束力があることが分かる。

この事実は以下のように解釈できる。ノーマルセルの部分では、セルの入口と出口は幾何学的に対称なのでほぼ等しい力が電子に対して働く。一方、入力カップラセルの部分については、入口側と出口側で構造が異なる。入口側では、軸方向電場が存在しない部分から電場が立ち上がって来るので、電場のlongitudinal方向の変化分は出口側に比べて大きくなる。結果として、入口側の B_θ 、 E_r が出口側より大きくなり、電子は収束される。出力カップラセルでは同様の理由で発散されるはずであるが、大きくは発散を受けない。これは、エネルギーが高くなっていること、および、図2の例では、電子の軌道が加速管中で十分に収束され、中心軸付近を通過しているために、 B_θ 、 E_r が共に r に比例して小さくなっていることによる。

4. 実験

加速管の収束効果を確認するために、SPRING-8線型加速器で、上流より4番目と5番目の加速管を用

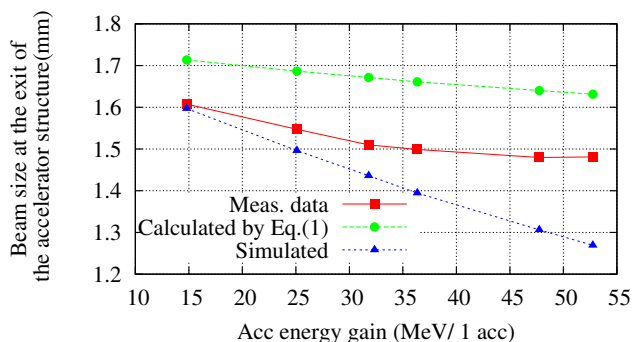


図 4: 加速管出口でのビーム径。(収束効果の実験とシミュレーションの比較。)

いて実験を行った。まず、この2つの加速管に RF パワーを入力せず、加速管前後のプロファイルモニタ (デマルケスト) によりビームサイズを測定した。その後、加速管へパワーを入力し、バンチが常に RF 電界のクレストに載るように調整しながら RF パワーを変化させて加速管出口でのビーム径を測定した。

RF パワーを入力しないときの加速管前後のビーム径から、電子ビームの加速管入射時の拡がり角が分かるので、収束の様子をシミュレートすることができる。加速管出口でのビーム径を、図 4 に示す。(1) 式でマトリックス計算した場合の結果も同時に示した。実験結果はいずれの計算とも一致していない。

このような結果となった理由は、加速管各位置でのビームエネルギーが完全に把握できていないこと、各プロファイルモニタごとの校正が十分にできていないために別々のモニタの結果を単純比較できないこと等が挙げられる。実験にはもっと上流側の加速管を用いるべきだったが、上流の加速管両端のモニタは単純比較できる状況ではなかった。また、本来、温度 30 度で使用するべき加速管を、バンチャー系の最適温度 28.5 度で使用しているために、完全には $2/3\pi$ モードになっていない。このため、加速管全体に渡っては RF のクレストに載っていないかった可能性がある。しかし、次に説明する寄与が大きいと考えられる。

5. 収束効果がビームに及ぼす影響

加速管による収束効果が四極電磁石のものと異なる点は、収束力が r の関数であること、すなわち、 x と y の関数であることである。したがって、加速管入口で電子ビームが r 方向にシフトして入射された場合、コマ収差が現れる。

図 5 に、コマ収差の出現をシミュレートした。このシミュレーションでは、電子バンチは 10 ps、 ϕ 5 mm のフラットトップ形状とし、図 2 と同条件で加速したものである。加速管に入射するとき、電子バンチの中心を x 方向に 5 mm シフトさせた。バンチの transverse サイズ、およびシフト量については効果が良くわかるように設定したものである。電荷量は 0.2 nC/bunch であり、マクロ電子同士の相互作用は全て計算している。図 5 に実線で電子密度分布を射影したものを示した。コマ収差により中心がずれている。

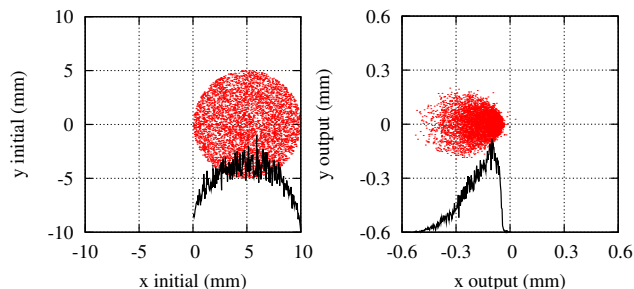


図 5: 加速管の収束作用によるコマ収差。左図が加速管入射前、右図が加速管出口でのビーム。

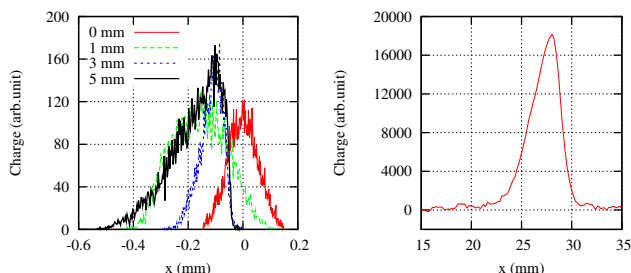


図 6: 加速管出口のビーム密度分布。左図: シミュレーション、右図: 観測波形。

図 6 左に、図 5 のシミュレーションで加速管入口でのシフト量を 0 mm~5 mm まで変化させた時の、加速管出口でのビームの密度分布を示した。シフト量によってビーム径が大きく変化するのが分かる。図 6 右に、図 4 実験時の加速管出口でのビーム密度分布を示す。シミュレーションとは電子エネルギー (加速管に 143 MeV で入射) が異なるが、中心が右側にずれており、加速管によるコマ収差の影響と考えられる。したがって、実験と計算を一致させようとするれば、電子ビームが加速管の中心を通る状態で精度良い実験を行う必要がある。

SPring-8 では、最上流部加速管の上流側には効果的なステアリングが存在しないため、この加速管の中心に電子ビームを入射できず、コマ収差が観測されている。今夏にステアリングを設置する予定である。

6. まとめ

加速管での収束効果について、SPring-8 の S バンド加速管に対して数値的な解析を行った。この結果、10MeV 程度の低エネルギー部分では四極電磁石の効果に匹敵する収束効果があることが分かった。実験が精度良く行えていないため、数値解析の結果が評価できていない。今後は、SPring-8 の RFgun テストベンチにおいて詳細な実験を行う予定である。また、この結果を、現在検討中の SPring-8 線型加速器の四極電磁石自動調整システムにフィードバックしていきたい。解析の手法も確立したいと考えている。

参考文献

- [1] A. Mizuno, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 528(2004) p. 387