

ATFにおけるRF Gunテスト実験のためのシミュレーション

長谷川 豪志、早野仁司^{A)}、栗木雅夫^{A)}

東京理科大学理工学研究科

〒 278-0022 千葉県野田市山崎 2641

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

〒 305-0108 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

この夏、KEK-ATF ではこれまでの熱電子銃に代わり高輝度、短パルス、低エミッタンスが期待されるフォトカソード RF Gun の現状での性能を評価し、今後の研究開発を進める上での参考とするため、インジェクター部にBNL型1.6セルRF Gun(GunIV)を設置しテスト実験を行う。テスト実験で期待されるRF Gunの性能を評価をするため、General Particle Tracer(GPT)[1]を導入した。本報告では、GPTを用いて行ったテスト実験のシミュレーション結果を報告する。

1 はじめに

KEK-ATFは、将来のリニアコライダー実現に向けた低エミッタンスやマルチバンチビームの実現、またそのほか様々な研究開発を行っている。現在ATFでは、電子源として熱電子銃を用い、取り出されたビームをSHB2台とS-band進行波型バンチャーでバンチングした後にS-band加速管に入れ加速している。しかしこれまでの研究からバンチャー系の振幅や位相の不安定が安定したリングへの入射の妨げの要因になっていることが分かってきた。そこでインジェクター部の安定化への取り組みとして、熱電子銃では達成出来なかった短パルス、低エミッタンスの電子源として注目されているフォトカソードRF Gunを検討している。

現在フォトカソードRF Gunは、これまでの熱電子銃に代わり高輝度、短パルス、低エミッタンスが実現できるシステムとして世界各国で研究開発されている。KEK-ATFでは、リニアコライダー実現のため特にフォトカソード型RF Gunでのマルチバンチビーム生成を目標に研究開発していく予定である。しかしRF Gunはその性能が、各Gunでまちまちであり、その理由も明確には把握出来ていないのが現状である。そのためKEK-ATFでは、この夏インジェクター部にBNL型1.6セルRF Gun(GunIV)を設置し、ATFに設置してある既存のモニター類を駆使して様々な条件でのビーム診断を行い性能評価を系統的に行う。特に、1.6nC/bunchのように電荷が多くなってくると始めのセルでの空間電荷効果によるエミッタンスの増大が問題になるため、この効果の軽減につながる検討は不可欠である。そのため新しくビームラインデザインの為のシミュレーションコードGPTを導入した。研究開発を進める上で実験結果を精度良く再現出来るシミュレーションコードは必要不可欠なツールであり、今回の実験結果との比較からGPTの評価を行う。

本報告では、実験概要及びGPTを用いたシミュレーション結果を報告する。

2 実験装置、及びシミュレーションコード

2.1 実験装置

テスト実験におけるセットアップは図1の通りである。ビームは、左側のRF Gunで生成され860mm下流に設置された3mのS-バンド加速管で約80MeVまで加速される。Gunと加速管の間には、BPM(ビームポジションモニター)がソレノイドの出口に1台、加速管入り口に1台の計2台が設置してあり、そのあいだにゲート弁と2段式で出し入れ出来る構造のファラデーカップとスクリーンが設置してある。ファラデーカップは、暗電流測定用であり、スクリーンは放出直後のビームプロファイルを確認するためのものである。又、加速した出口にBPM1台を設置し前の2台を含め計3台のBPMを用いることによってビーム軌道を確認することができる。そして、その後ろに設置してあるICT(電流モニター)から電荷量を求める。その後、2台のQ-Magnetの強さを変えてその時のビームサイズをワイヤースキャナーを用いて測定しエミッタンスを求める。バンチ長は、ビームラインに金属板を入れてビームと衝突させ、その境界面で発生するOTR光を光学レンズなどを用いてストリークカメラまで導き測定する。エネルギー幅は、マグネットでビームを曲げをスクリーンに当てて測定する。

2.2 シミュレーションコード

今回の研究では、高周波加速空洞内電場及びソレノイド磁場についてはPOISSON-SUPERFISH[2]を用いて計算した。図2は、横軸がビーム軸方向、縦軸が垂直方向に取った2次元図で、計算で使用したGun内の電場の様子を示している。この結果をGPTに取り込みシミュレーションに用いた。GPTは、ビームを3Dで扱うことができ、指定した時間幅で計算することが出来るため、電磁場中のビームも各パラメータを時間もしくは空間でトレースすることが出来る。図3は、横軸がビーム軸方向(z軸)、縦軸が垂直方向(x軸)であり、カソードから加速管出口までのビームをマクロ粒子軌道としてx-z平面に射影したものである。

3 シミュレーション

シミュレーションでは、ビームをビーム軸に対して進行方向と垂直方向に分けガウス分布を仮定した。垂直方向のスポットサイズは 4σ で3mm幅とし、進行方向はレーザーのパルス幅(FWHM)で10psとした。次にRFの入射位相とソレノイドの磁場を変化させ、エネルギーやエミッタンスを求め、高エネルギー、低エミッタ

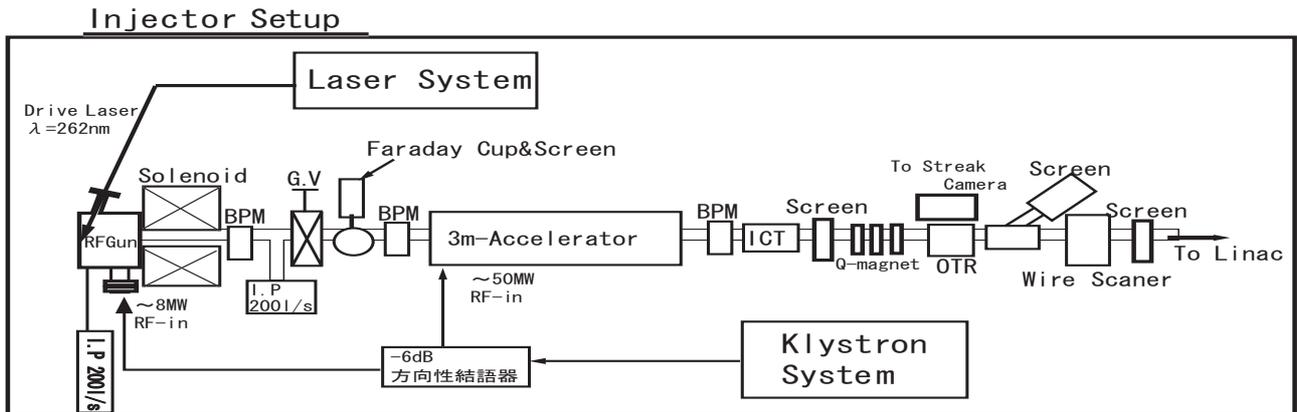


図1: 実験装置概要図

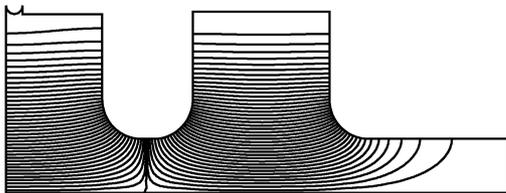


図2: SuperFish を用いた電磁場の計算結果。横軸がビーム軸方向、縦軸が垂直方向とした時の空洞内の電場の様子を示している。この計算結果をマップ情報として GPT に取り込み配置した

カソード面最大電界	140MV/m
共振周波数	2856 MHz
電荷量	1 nC
レーザーパルス幅 (FWHM)	10 ps
スポットサイズ (4σ)	3 mm
測定位置	$z=2.36$ m

表1: シミュレーションにおける初期条件: カソード面を $z=0$ とし、レーザーのパルス幅は時間幅をもってカソードに照射される

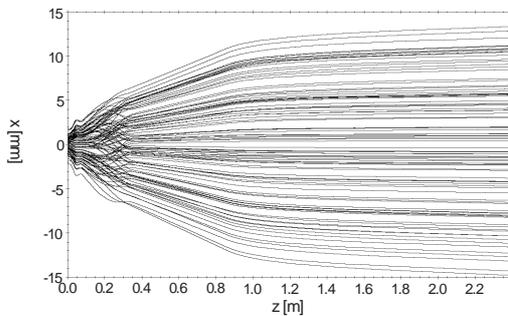


図3: カソードから加速管出口までのマクロ粒子の軌道を z 軸が進行方向、 x 軸が垂直方向として $x-z$ 平面へ射影した図

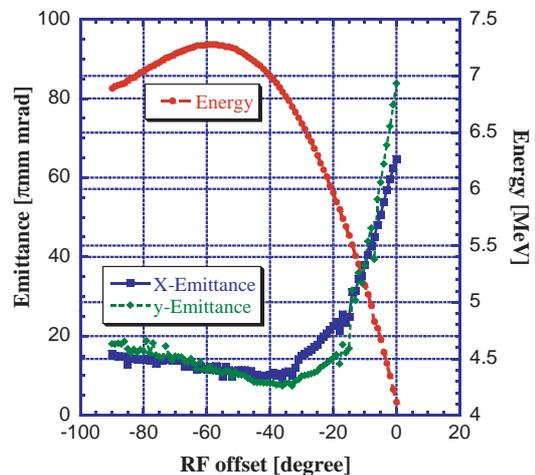


図4: Gun に印可される高周波の入力位相とソレノイドの下流約 520mm 地点でのビームエネルギー及び、エミッタンスの関係 (カソード表面での電界が最大加速勾配になる時を 0 度とする)

ンスになる位相を選択した。図4は、Gun の RF 入力位相を変化させた時ソレノイド下流 520mm でのエミッタンスとエネルギーの変化を表している。x、y 共にエミッタンスが小さいのは、RF 入力位相が-30度~-50度の間であることが分かる。入力位相はエミッタンスが小さくなる所で選択し、RF の入力位相を-40度、磁場を 0.15 [T] に固定した。そのときのビーム到達エネルギーは約 6.5~7MeV である。最後に最適化したビームを加速した後、加速管の後方 0.5m の所での規格化エミッタンスを求めた。今回は、諸事上から 3m S-band 加速管を組み込むことができなかったため、代わりに加速管

を 1m とし、3m 加速管を通したときと同程度のエネルギーである 70~80MeV 程度まで加速して計算した。シミュレーションで用いた各パラメータを表1に、結果を表2に示す。

今回のテスト実験のセットアップは以前に Superfish と Parmela[3] を用いて決定されたものでありこの計算

電荷量	1nC
ビーム到達エネルギー	74.8 MeV
RMS 規格化エミッタンス	$\epsilon_x = 13.4 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
	$\epsilon_y = 12.8 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
バンチ長 (FWHM)	7.9 ps

表 2: シミュレーション結果:z=2.36m 地点での計算値

でエミッタンスは $3\pi \text{ mm mrad}$ 前後という結果を出している。しかし、GPT を用いた結果は表 2 にあるように Parmela を用いた結果よりも約 4 倍ほど大きなエミッタンスを示している。そのためテスト実験の結果を用いて 2 つのシミュレーターの評価をする予定である。

次に初期パラメータからレーザーのスポットサイズ、電荷量によるエミッタンスの変化を計算した。エミッタンスとスポットサイズ及び、ビーム当りの電荷量の関係 (図 5) と (図 6) に示す。

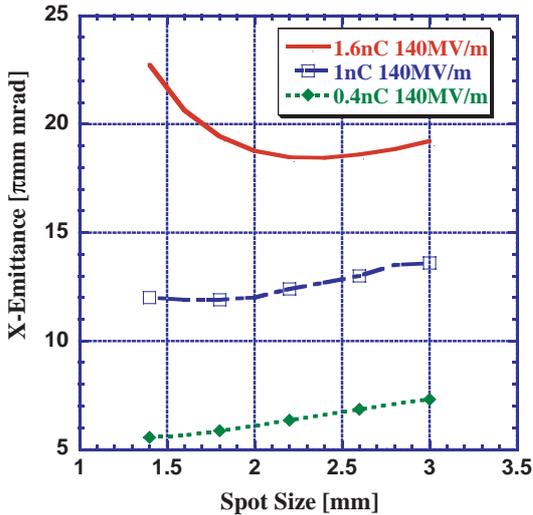


図 5: スポットサイズとエミッタンスの関係図。電荷量が小さくなるほどエミッタンスを最小にするスポットサイズも小さくなる

図 5 から、1.6nC の時スポットサイズが小さくなるにつれてエミッタンスも小さくなり、2mm~2.5mm の間で最小値をとり、また増加に転じていることがわかる。これは、スポットサイズが大きくなると空間電荷の効果があまり効かず、放出段階でのビームの拡がりエミッタンスを大きくしていくと考えられる。逆にスポットサイズが小さくなると放出時のビームは小さくなるが、空間電荷の効果が大きくなるためにエミッタンスが大きくなっていると思われる。この 2 つの効果によってエミッタンスが最小になるのが 1.6nC では、2mm~2.5mm の間であると考えられる。これは電荷量が少なくなった時も同じことが考えられる。他の 2 つを見てみると 1nC では最小値付近の様子が見え始めているように思われるが、0.4nC ではまだ空間的拡がりの方が大きく最小まではいっていない。1.4mm 以下のデータが足りないために判断は出来ないが 1.6nC と同じ傾向を示しているように考えられる。

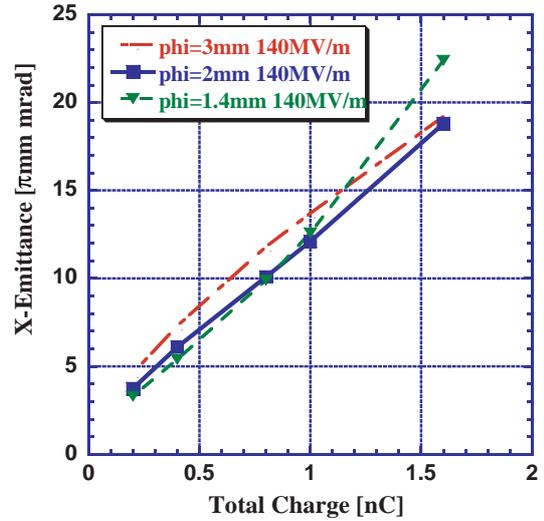


図 6: 電荷量とエミッタンスの関係図。スポットサイズが小さいほど電荷量が大きくなってきたときの空間電荷の効果が大きくなりエミッタンスの増加につながる

これをエミッタンスと電荷量との関係のグラフで見ても (図 6)。電荷量が小さいときはスポットサイズが小さい方がエミッタンスも小さいが、電荷量が大きくなると逆にスポットサイズが小さいほどエミッタンスの増え方も大きくなって来ることが見て取れる。これらのことから、レーザーのスポットサイズと電荷量との間にはエミッタンスを最小にする最適な条件が存在するものと考えられる。

4 まとめと今後の予定

テスト実験の為のシミュレーションを GPT を用いて行った。最適化の結果約 $13\pi \text{ mm mrad}$ というエミッタンスを得ることが出来た。また、電荷量を増やすとエミッタンスが急激に増加することからカソード表面に印可する加速電界を高くしていくことが必要であるが、同じ電界の時のエミッタンスの最小値は電荷量とレーザーのスポットサイズとの関係で最適な条件が存在すると思われる。

今後は、テスト実験とシミュレーション結果との比較を行う予定である。そして、GPT が RF Gun の評価をするためのコードとしてどの程度実験結果を再現しているかを確認する。又、可能であれば実験結果に近い結果を計算出来るように改善することによってリニアコイダーに最適な RF Gun の研究開発に活かしていく予定である。

REFERENCES

- [1] GPT User Manual, Pulsar Physics, Flamingostraat24,3582 SX Utrecht, The Netherlands.
- [2] J.H.Billen and L.M.Young, "POISSONSUPERFISH" Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-1834(revision March 14,2000)
- [3] PARMELA ,Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-1853-1996