

SIMULATION STUDY FOR EMITTANCE IN THE SPring-8 RF GUN

A. Mizuno^{*)}, T. Taniuchi, K. Yanagida, S. Suzuki and H. Hanaki

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
Koto 1-1-1, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198 JAPAN

Abstract

A photo cathode RF gun has been studied in SPring-8 in order to obtain high density, short pulse and low emittance beam. A Simulation code has developed to compare beam characteristics with experiment results. In this report, we show results of emittance comparison between experiments and simulations. Then, using this simulation code, we discuss how to reduce beam emittance of our experiment set.

シミュレーションによるSPring-8 RF電子銃のエミッタンス評価

1. はじめに

SPring-8では、将来のFEL等の電子源として、高密度（ $\sim 1\text{nC}/\text{bunch}$ ）、短パルス（ $\sim 10\text{ps}$ ）、低エミッタンス（ $\sim 1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ）を同時に満たすことのできる光陰極型RF電子銃の開発を行っている。

空洞形状、RF位相、パワー、レーザースポット形状、集束磁場分布等のパラメータを低エミッタンスに対して最適化するために、我々はまず、実験結果を再現できるシミュレーションコードを開発し、それを用いてパラメータの最適化デザインを行うという手法を選択した。実験との比較を行うには、3次元で実際の電磁場を再現できなければならない。また、実験で測定できるエミッタンスは、ソレノイド集束系の下流であるので、ソレノイド磁場中でのエミッタンスを計算できなければならない。シミュレーションコードは、これらの要求を満たしたものを作成した[1]。

並行して実験装置の整備を続け、昨年度よりシミュレーションと実験の間でエミッタンスの比較検討が可能な状況となった。

本報告では、上記結果、および、本装置において更なる低エミッタンスを目指すための考察について示す。

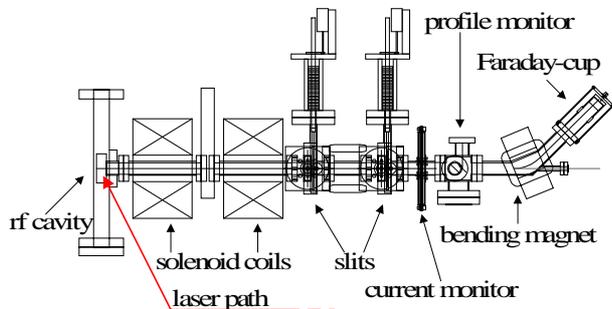


図 1 実験装置概略図

2. 装置[2]、およびシミュレーションコード

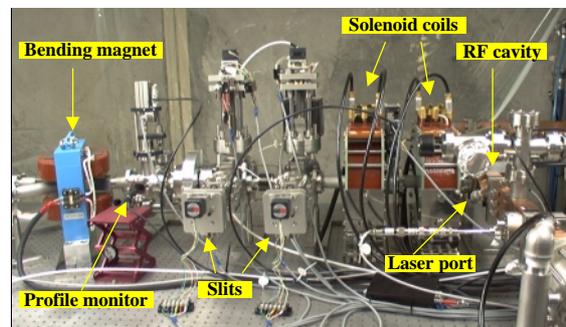


図 2 実験装置

図 2において、中央右寄りに2台のソレノイドコイルがある。その右にシングルセルのRF空洞[2]があり、レーザーポートが見えている。電子ビームは左側に引き出す。コイル下流には、手前にステップモータが見えるスリットが2台あり、これとファラデーカップを組み合わせるとエミッタンスを測定することができる。最下流にはエネルギー分析用偏向電磁石がある。

3. 実験とシミュレーションの比較

シミュレーションの妥当性を確認するために、エミッタンスについて実験との比較を行った。

3.1 RF初期位相

図 3は、RF初期位相に対するビームエネルギーの関係である。RF初期位相 ϕ は、カソード表面の最大電界強度を E_0 、カソードからバンチ先頭の電子が発生するタイミングを $t=0$ として、

$$E_{cathode} = E_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (1)$$

^{*)} A. Mizuno, 0791-58-0893, mizuno@spring8.or.jp

と定義する。

実験とシミュレーションを比較する上で初期位相は非常に重要であるが、図 3 のように計算と比較することによって、実験でのRF初期位相の絶対値を求めることができる。

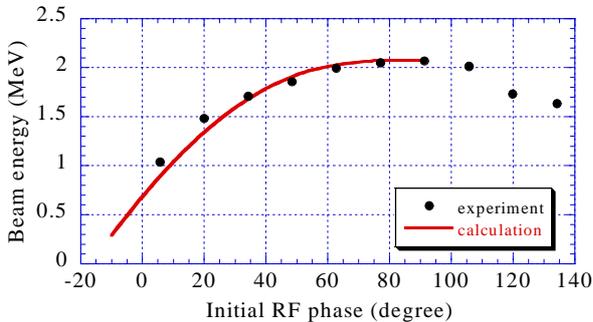


図 3 RF 初期位相とビームエネルギーの関係

3.2 シミュレーションでのエミッタンス

図 4 に、エミッタンス計算結果の一例を示す。実験セットで測定できるのは 2D-Emittance (x-Emittance、y-Emittance) であるのでシミュレーションでもこのエミッタンスを計算するが、ソレノイドコイル内では電子の運動方程式中で変位xとyがカップリングしているので、図 4 の様に 2D-Emittanceは変化する。従って、ソレノイド下流部までの計算を行い、第 1 スリットの位置でのエミッタンス計算値と、実験値の比較を行う。なお、シミュレーションでの 2D-エミッタンスの定義は

$$\epsilon_x = \gamma\beta\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2} \quad (2)$$

であるので、実験では1のエミッタンスを測定した。

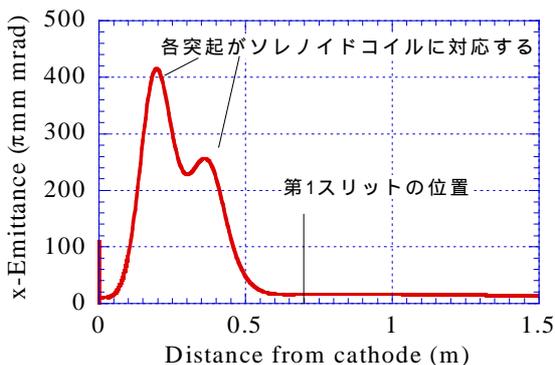


図 4 ビームラインに沿ったエミッタンスの変化 (計算値)

3.3 エミッタンスの比較

図 5 に、エミッタンスの比較結果 (初期位相依存性) 表 1 に実験、およびシミュレーションでの各パラメータを示す。Initialのtransverseビーム形状は正確には測定できなかった。シミュレーシ

ョンにおいてはガウス分布を仮定し、半径 (1 値) を3通りに変化させて計算したところ、 $r=0.75\text{mm}$ で実験結果とほぼ一致した。実験で得られた最小エミッタンスは初期位相60度のとき約 $17\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であった。

なお、実験とシミュレーションのグラフが、互いに横方向へシフトしているように見える。初期RF位相の同定は図 3 のグラフで行ったが、正確に同定できていない可能性がある。横方向に少しずらせば、シミュレーションと実験値は良く一致する。

また、実験では、初期位相を変化させるとビーム電荷量も変化するが、シミュレーションではこの効果を入れていない。初期位相30度付近でシミュレーションと実験値にずれがあるのは、このためと考えられる。

表 1 比較実験におけるパラメータ

カソード面最大電界	90MV/m
初期ビームバンチ長 (レーザーパルス幅)	10ps
ビーム到達エネルギー	2.1MeV
1パルスあたり電荷量	0.8nC
第1ソレノイドコイル	1100 Gauss
第2ソレノイドコイル	520 Gauss

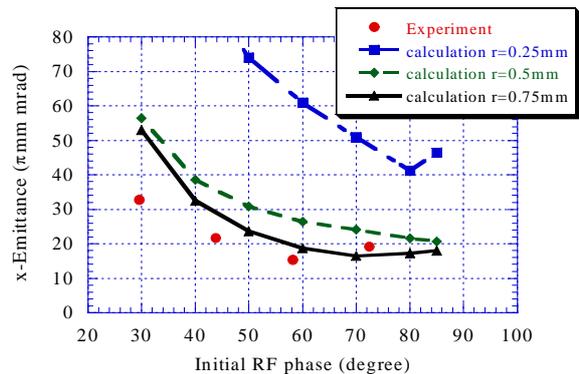


図 5 実験とシミュレーションでのエミッタンスの比較

4. 低エミッタンス実現に向けての検討

本シミュレーションコードを用いて、低エミッタンス実現に向けたパラメータサーベイを行った。

図 6 に、エミッタンス、エネルギーブレッド、ビームバンチ長の、各初期位相依存性を示す。

エミッタンスは初期位相が小さいほど大きくなるが、主たる原因は、その領域でエネルギーブレッドが大きいことによる。レーザーのパルス幅は10psであり、RF周波数が2856MHzであるので、バンチ長は位相にして約10度に相当する。したがって、図 3 を見れば、バンチの先頭と後方では、10度分のエネルギー差が生じることが分かる。すなわち、空洞の特性として、初期位相が小さい(0度に近い)場

合はエネルギーブレッドが大きくなる。

これに対し、初期位相が大きくなるとエネルギーブレッドが小さくなるためにエミッタンスは減少する。しかし、実験を行った条件、すなわちカソード表面の最大電界強度が90MV/mの場合、図6でみられるように、位相が70度以上になるとエミッタンスは再び上昇傾向に転じる。これは、ビームのlongitudinal方向のエネルギー分布が一様になるためにパンチ長が短くなり、その結果、空間電荷の影響が顕著になってくるためと考えられる。

本年2月には、RF空洞の最大電界が140MV/mに達した。レーザーの不具合等でエミッタンスの測定はできていないが、この場合のシミュレーション結果も示した。この計算では、空間電荷効果を緩和するためにInitialのtransverseビーム形状を1が20mmのガウス分布とし、そのうち、中心の $r \leq 1$ mmの範囲のみを計算に用いた。カソード面最大電界が高いこととの相乗効果により、空間電荷効果が緩和された結果、エミッタンスは位相80度のときに $7.3\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ まで改善された。しかし、位相85度の場合では、空間電荷の効果でエミッタンスが若干増加する。

この条件下でさらに空間電荷効果を緩和するために、レーザーパルス幅を20psにした場合の計算も行った。この場合は初期位相を90度に近づけてもエミッタンスが増加しないことが分かる。さらに、空間電荷効果の影響が少ないため、Initialのパンチ幅を2倍にしたにも関わらず、最終的に得られるパンチ幅は位相85度の場合、2.6mm(1値)と、10psの場合と同等になっており、90MV/mの場合に比べれば短くなっている。(短くなっても、エネルギーが高いため、空間電荷の影響は少ない。)

この条件で実験を行えば、 $6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のエミッタンスが得られると予想される。

5. まとめと今後の予定

高密度、短パルス、低エミッタンスビームを目指して光陰極型RF電子銃の開発を行い、同時にシミュレーションコードの開発を行った。実験では、2D-Emittanceの値として、最小値 $17\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ を得ることができた。また、この値は、シミュレーションとほぼ一致した。エミッタンスのRF初期位相依存性もほぼシミュレーションで再現できている。細かい点で一致しないところがあるものの、当面の評価に本シミュレーションコードを使用できる目処がついたと考えている。

実験で得られたエミッタンス、 $17\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ は十分小さいとはいえないが、RFパワーを増し、レーザーのtransverse方向ビーム強度を一様にし、さらにレーザーのパルス幅を伸ばす等、空間電荷効果を緩和する工夫をしてやると、約 $6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のエミッタンスを得ることができるとの計算結果を得た。現状のシステムではこの条件での実験はできないが、今秋

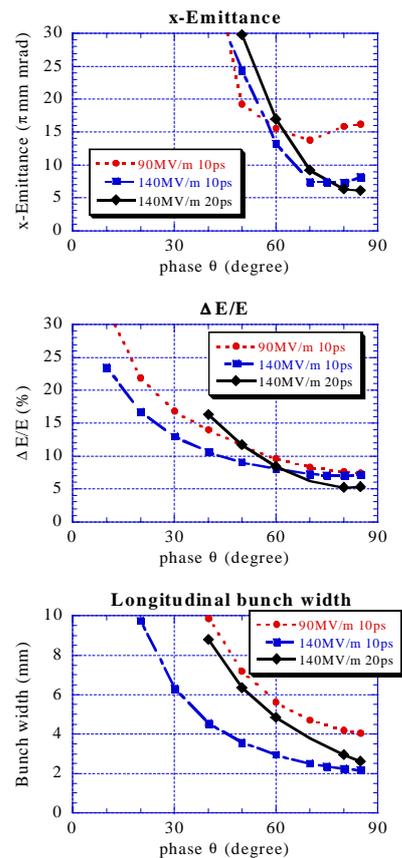


図6 電子ビーム各パラメータの、RF初期位相依存性をシミュレーションしたもの。実験での条件(90MV/m、10ps、0.8nC/bunch)と、さらに高電界での条件を比較している。

以降、実験可能となる予定である。

ところで、(1)式の定義により、初期位相90度とは、カソード表面で電子が発生する瞬間の電界強度が0となる場合に相当する。この場合には、カソードより発生した直後の極低エネルギー電子が大きな空間電荷効果を受けることになるので、初期位相が90度に近い位置でエミッタンスが最小となるような現状のRF空洞は、低エミッタンスを目指す場合不利である。空洞の構造上、初期位相0度でビームのエネルギーブレッドを0にすることは不可能であるが、次のステップとして、現状よりも小さな初期位相でエミッタンス最小、すなわち、エネルギーブレッドも最小になるようなRF空洞を設計する計画である。

参考文献

- [1] A.Mizuno, et al., "Study of an RF gun in the SPring-8". Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.125, Sapporo, July 7-9, 1999.
- [2] T.Taniuchi, et al., "Initial results of RF gun experiment". Proceedings of PAC'99, p.2015, New York, 1999