

[09-P06]

Studies of an RF Gun in the SPring-8

A. Mizuno, T. Asaka, S. Suzuki, T. Taniuchi, K. Yanagida and H. Hanaki

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
Mihara 323-3, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198 JAPAN

Abstract

A photo cathode RF gun has been studied in the SPring-8 Linac in order to produce high peak current and low emittance beam. Simultaneously from calculation approach, we had studied simulations for beam diagnostics. A three-dimensional beam tracking code which includes space charge effects for an rf gun test bench was developed.

Experiments for laser injection and acceleration had been started from this Feb. We report some experimental and simulation results.

SPring-8におけるRF電子銃の開発

1. はじめに

SPring-8では、将来のSASE計画等の電子ビーム源として、ならびに、現線型加速器の電子銃の置き換え用として、低エミッタンス、高密度ビームを目指したRF電子銃の開発を行なっている。昨年末までに、RF系、ビームラインを含む全ての実験装置のセットアップを完了させ、今年度当初からレーザーをRF空洞に入射して実験を開始した。一方、空間電荷効果を考慮した3次元のビームトラッキングコード[1]を開発し、実験との比較検討を行なっている。シミュレーションにより実験を再現し、実機に反映させることも本研究の目的である。

2. 装置の概要

図1に、実験装置の概略図を示す。single cellのSバンド空洞は、空洞内の電磁場の軸対称性を考慮し、RFポートを対称位置に2つ設けた。このため、Q値の低い(13000)空洞となり、結果としてRFパルス幅を短くできることから高電界に有利な構造となっている。カソード表面電界は124MV/mを達成し、量子効率率は 3.7×10^{-5} を達成している[2]。RF空洞内面の銅をカソードとして使用している。

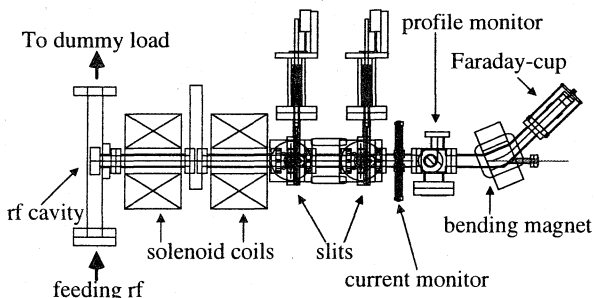


図1 実験装置の概略図

レーザーはYLFの4倍高調波(262nm)を用いており、モードロック周波数178.5MHz、最大繰り返し

10pps、パルス幅10psである[3]。

ビームラインは、2台のソレノイドコイル、エミッタンスを測定するための2組のスリットと電流モニタ、およびエネルギー分析用偏向電磁石とファラデーカップより構成されている。

3. トラッキングコード

空間電荷効果を含めたビームトラッキングを行なうことができるコードはMAFIA等があるが、メッシュを細かく切るためには多くのメモリーを必要とするため、3次元で精度の良い計算を行なうことは難しい。このため、我々は、マクロ粒子間の相互作用を全て計算することにより、メモリー消費量が少なく、かつ精度の良いトラッキングコードの開発を行なった。そのため、計算時間は犠牲となっているが、昨今のCPU高速化に伴い、実用に耐えうるものとなっている。

電子は加速度運動をしているが、これを計算に反映すると非常に煩雑になるので、等速直線運動をするものとしている。すると、電子Bが電子Aの位置に誘起する電磁場は

$$\mathbf{E}_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\gamma^2} \frac{-e\mathbf{r}}{\left[|\mathbf{r}|^2 - \frac{|\mathbf{v}_B \times \mathbf{r}|^2}{c^2}\right]^{3/2}}$$

$$\mathbf{B}_A = \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_B \times \mathbf{E}_A$$

で表される。 \mathbf{r} は電子Bから電子Aに至るベクトル、 γ は電子Bのエネルギーに比例する。したがって、電子Aの運動方程式は

$$-e(\mathbf{v}_A \times \mathbf{B}_A + \mathbf{E}_A) = m_0 \frac{d(\gamma_A \mathbf{v}_A)}{dt} \quad (1)$$

となる。(1)式を変形し、サフィックスAを除くと

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

となり、ルンゲクッタ法を適応できる。この式をすべてのマクロ粒子相互間に適応して計算を行っている。RF空胴内電磁場はMAFIAで計算したものを取り込んでおり、ソレノイド磁場はトラッキングコード内で計算を行っている。また、カソードの鏡像効果を考慮している。

4. エネルギースペクトラム

RF空胴内での電界強度は、カソードから電子が発生するタイミングを $t=0$ とすると、

$$E_{cavity} = E_0 \cos(\omega t - \phi)$$

で表させる。したがって、空胴で加速された電子のエネルギーはRFの初期位相 ϕ に依存する。図2にビームエネルギーの初期位相依存性を示す。

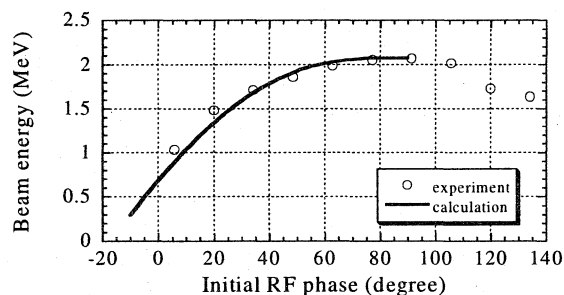


図2 ビームエネルギーのRF初期位相依存性

実験データだけでは初期位相の絶対値は分からないが、このように計算値と比較すれば絶対位相を測定したことになる。計算値はカソードの表面電界が90MV/mと仮定して計算したものであり、実験結果と良く一致する。このときの空胴へのRF入力パワー測定値は10.8MWであり、計算上のカソード表面電界は98MV/mであった。

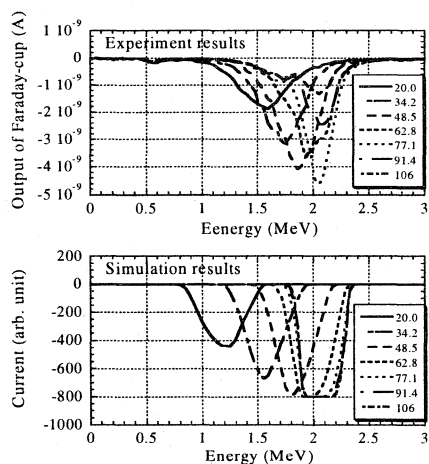


図3 エネルギースペクトラムの初期位相依存性

図3に、エネルギースペクトルの初期位相依存性を示す。実験データから初期位相77.1度の時にエネルギーが高く、 ΔE の比較的小さなビームが得られることが分かる。これはトラッキングコードによる計算より得たエネルギースペクトラムとも良く一致する。なお、図3の実験データは、レーザーを入射していない時のダークカレントを差し引いたものである。図4に示すように、シミュレーションでは、空胴出口でのエミッタンスは初期位相70度くらいまではほとんど変化が無いが、70度を超えるとエミッタンスが悪化する。これと図3とを同時に考慮すれば、初期位相60~70度あたりに、エミッタンスが良く、かつエネルギーが高くて ΔE の比較的小さい最適値がある事が分かる。

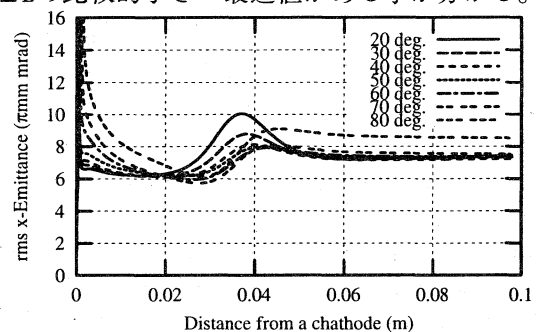


図4 初期位相とエミッタンスの関係、RF空胴出口はカソードから0.074mの位置である。

5. ダークカレント

図3の実験中に得られたダークカレントのエネルギースペクトラムを図5に示す。ダークカレントのスペクトルは、エネルギー中心が約1.7MeVにある。図2と比較することにより、初期位相40度に対応するタイミングで放出されたダークカレントがピークとして観測されているのが分かる。

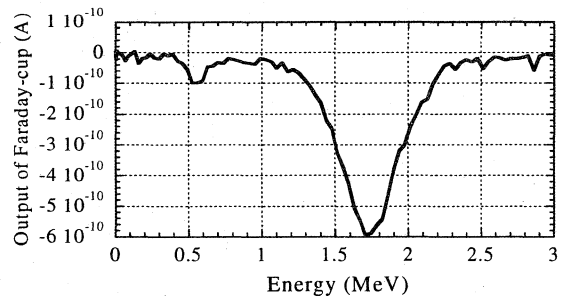


図5 ダークカレントのエネルギースペクトラム

図6に、シミュレーションで得られたダークカレントのエネルギースペクトルを示す。このシミュレーションでは、ダークカレントはカソード面だけから放出されるものとした。ビームのパルス幅をRF波長と同程度にとり、とりあえずエミ

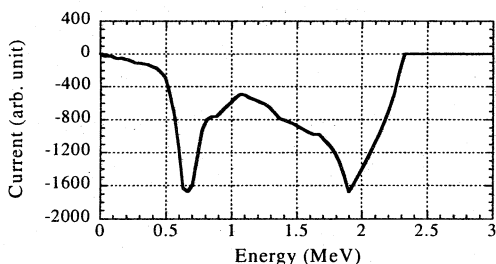


図 6 ダークカレントのシミュレーション

シミュレーション量は空洞内電場強度に比例するものとした。また、電荷密度が小さいので空間電荷効果は無視している。このようにシミュレーションによっても 1.7MeV 近辺にピークが出るのが分かる。エネルギー分布が生じるのは、主にソレノイド磁場でのエネルギー選択性による。シミュレーションでは低エネルギー側にもピークが出ている。このピークは、図 2と比較することにより初期位相が 0 の付近、すなわち電界が最大の時に出現したものである。実験で観測されないのは、エネルギーが非常に低くて地磁気によって曲げられ、ファラデーカップまで到達できないためと考えられる。ダークカレントについても、今後詳細な検討を行う予定である。

6. エミッタンス測定

2台のスリットとファラデーカップを用いてエミッタンスを測定した。図 7に測定したビームの、位相空間分布 (1σ 包絡線)を示す。この図より、 1σ の規格化X-エミッタンス、およびY-エミッタンスは、図 7中の点内の面積として、それぞれ $24\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、および $36\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ と算出される。また、このときの実験パラメータを表 1に示す。

表 1 エミッタンス測定時のパラメータ

電荷量	0.8 nC/bunch
パルス幅	10 ps/bunch
ソレノイドNo.1	1100 Gauss
ソレノイドNo.2	510 Gauss
レーザーパワー	200 μm /pulse
ビームエネルギー	2 MeV

図 8に、このエミッタンス測定に対応したシミュレーション結果を示す。シミュレーションでの rmsエミッタンスの定義は

$\epsilon_x = \gamma\beta\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2}$, (y方向も同様) であり、式より 1σ のエミッタンスに対応する。途中の2つの山はそれぞれ2つのソレノイドコイルに対応している。ソレノイドコイル内ではxとyのカップリングがあるために、上式の定義ではエミッタンスが保存しない。ファラデーカップの位置は、

ほぼカソードから1.5mの位置となる。

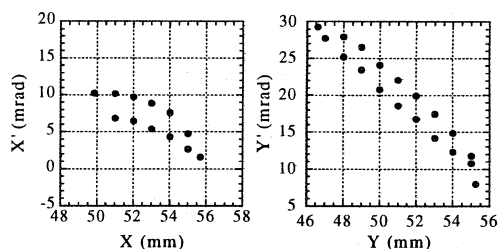


図 7 ビームの位相空間上プロット、1sの包絡線である。Xは水平方向、Yは垂直方向を示す。

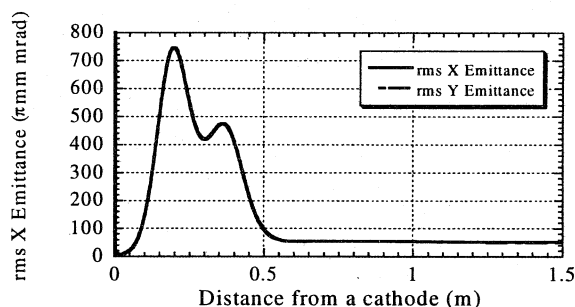


図 8 エミッタンス変化のシミュレーション

図 8においては、ソレノイドコイル通過後のエミッタンスは約 $50\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ となり、実験とは一致しない。この測定はファーストデータであるため、実験との不一致の原因ははっきり分らないが、これから更にエミッタンスの各パラメータ依存性を測定していく必要がある。

なお、シミュレーションにおいてはRF空洞出口直後のエミッタンスは数 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ となる。ソレノイド磁場分布を最適化してやるとコイルを通過した後も空洞出口のエミッタンスが保存されるはずであるので、シミュレーションの上、コイルの再配置を行なう必要があると考えている。

7. まとめ

SPring-8では、RF電子銃の実験が始まったところである。今度、ソレノイド磁場、RF位相、レーザースポット形状等のパラメータをふった詳細な実験を行ない、シミュレーションと比較検討していく予定である。

参考文献

- [1] A.Mizuno, et al., "Simulation for an rf gun test apparatus in the SPring-8 Linac". Proceedings of PAC'99, New York, 1999,
- [2] T.Taniuchi, et al., "Initial results of RF gun experiment". Proceedings of PAC'99, New York, 1999
- [3] K.Yanagida, et al, AIP conference proceedings 413, 299(1997)