

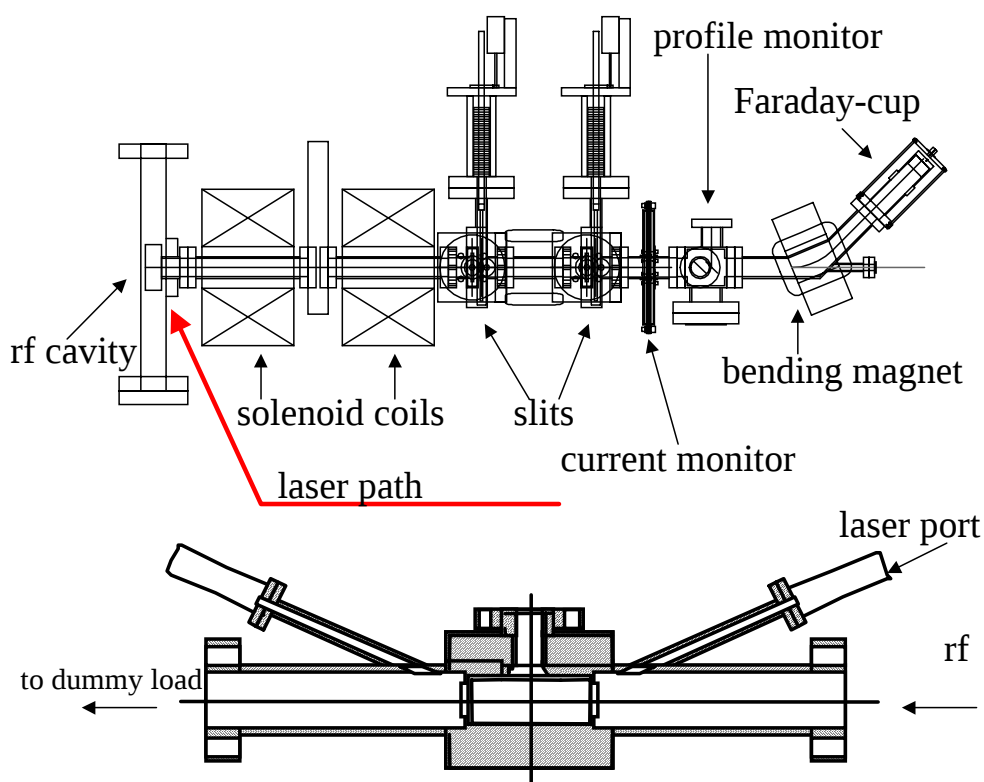
0. RF 電子銃とは

一般的に、現在の線型加速器では、熱陰極型 DC 電子銃が多く採用されています。Spring-8 のライナックもそうです。この電子銃では、ヒーターでカソード（バリウム含浸型タングステン）を熱して電子を取り出します。電子は、カソードとアノードの間に加える高圧により引き出してやります。

ただし、ここでの高圧は Spring-8 では 180kV です。日本では、250kV で安定して稼動している例もありますし、500kV でも可能と言われていますが、この程度です。

このような電圧で加速された電子のエネルギーは非常に低く、特に高電化密度の時は電子同士の反発力の影響（空間電荷効果）を受けやすいものです。このため、ビームの質、すなわちエミッタンスが非常に悪化してしまいます。

RF 電子銃は、RF 空洞の一端の壁をカソードとして使用するものです。カソードから電子ビームを取り出した直後に、RF によって加速してやることができます。従って、電子銃直後の電子のエネルギーは数 MeV になります。この場合、数百 keV の電子に比べて空間電荷効果による影響が相対的に小さくなり、エミッタンスの悪化を小さく抑え、質の良いビームを生成できます。



さらに、カソードを熱して熱電子を取り出すのではなく、光電効果の原理を利用して、レーザーをカソードに照射することにより電子を取り出してやります。現在のレーザー技術により、レーザーのパルス幅は数 10fs から任意に選択できます。したがって、20ps 程度のレーザーを照射すれば、バンチャ系無しではじめから 10ps 程度の電子バンチを取り出してやることができます。

RFgun 実験グループでは、世界一ビームの質（エミッタンス）が良い電子銃を作るために研究を行っています。

1. エミッタンスとは？（なぜ電子銃でのエミッタンスが問題か？）

図 1 のようにビーム中心軌道を s 、ビーム軌道からの電子の変位量を x 、電子ビームのビーム軌道に対する傾きを x' とします。 $x - x'$ 位相平面上に 1 つのバンチに含まれる電子の位置をプロットすると、一般的に図のように楕円が描かれますが、この楕円の面積をエミッタンスと呼びます。この面積が大きいと全体として広がりやすいビーム、1 つ 1 つの電子の向きがバラバラなビームとなり、面積が小さいと、電子の運動方向が揃った、シャープなビームということになります。

このエミッタンス楕円は、ビームの進行に伴って位相平面上で回転しますが、面積そのものはある条件を満たした場合には変化しません。これが、電子銃の位置でエミッタンスの良いビームを生成する必要がある理由です。エミッタンスの悪いビームを生成した後に、後からエミッタンスをよくしようと思っても、できないのです。

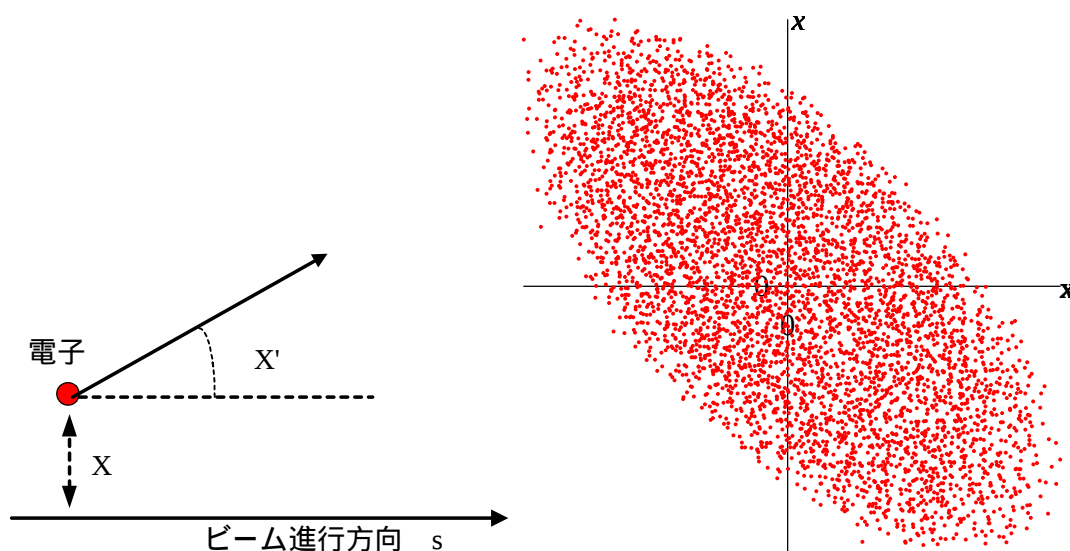


図 1 座標の定義とエミッタンス楕円

2. エミッタンスが保存される条件とは、

図2のように、2つの電子があるとし、それぞれの位相平面上での座標を点 $a(x_1, x_1')$ 、点 $b(x_2, x_2')$ とする。この2つの電子が時間とともに移動し、位相平面上での座標が点 $d(X_1, X_1')$ 、点 $e(X_2, X_2')$ になったとする。このとき、四辺形 $Oacb$ の面積と $Odfe$ の面積が一致する条件を求めればよい。(この場合は2個の電子で考えているが、複数の電子があった場合でも任意の2個の電子でこの条件が満たされるなら、エミッタンス楕円の面積は保存されるはずである。)

四辺形 $Oacb$ の面積は、ベクトル Oa と Ob の外積で表されるので、面積 W は

$$W = x_1 x_2' - x_1' x_2$$

である。上記2つの四辺形の面積が一致することは、要するに $dW/ds = 0$ 、すなわち、

$$dW/ds = x_1' x_2'' + x_1 x_2'' - x_1'' x_2' - x_1' x_2'' = x_1 x_2'' - x_1'' x_2' = 0 \quad (1)$$

であればよい。上式を満たすためには、任意の電子について、

$$x'' = Kx \quad (2)$$

が成り立てばよい。

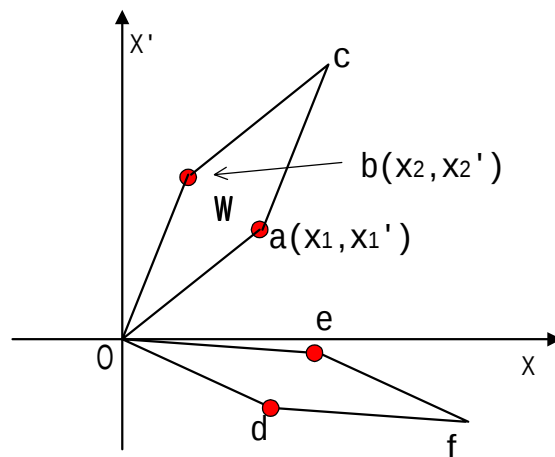


図2 エミッタンス保存の考え方

3. 空間電荷反発力によってもエミッタンスは保存されるか？

加速器では、Q 電磁石を用いているために、一般に(2)式が成り立ちます。ただし、K は負となります。左辺の x の 2 回微分は、ビーム進行方向に対し直角方向へ電子が受ける力を表していることに他なりません。(この微分は s の微分なので、そのままでは力ではありませんが、速度一定の場合は s は t に比例するので、 t の微分と考えても大きくは違いません。) K が負の場合、電子の中心軌道からの変位が大きければ、大きな力で中心軌道に戻されます。変位が小さければ、小さな力で戻されます。要するに中心軌道を中心にして調和振動(単振動)します。この振動はベータatron振動と呼ばれているもので、聞いたことのある人も多いでしょう。

では、低エネルギーで問題となる空間電荷反発力の場合はどうでしょうか？ この空間電荷効果では、電子バンチ中で、外側にある電子ほど外側に向かって大きな力を受けます。したがって、(2)の K が、今度は正となって、エミッタンスは保存??

ちょっと待ってください。確かに外側の電子ほど大きな力を受けるので K は正になりますが、 x に比例した力を受けるかどうかはわかりません。

空間電荷効果による x'' と x の関係は、電子バンチ内部の電子の位置分布により決まります。もちろん、 $x'' = Kx$ ($K > 0$) を満たす理想的な場合も考えられます。(電子バンチが長さ無限長の円筒型とする。この円筒の中に均等に電子が分布している場合は、条件を満たすことができます。) この場合は空間電荷効果が働いてもエミッタンスは悪化しません。ただし、たいいていの場合、 $x'' = Kx$ は満たさない。また、折角 $x'' = Kx$ を満たした電子分布になっていたとしても、それぞれの電子に力が働くために電子分布に変化が起こってしまい、 $x'' = Kx$ を維持できなくなってしまう。

したがって、一般的には、空間電荷によってエミッタンスは維持されず、悪化します。カッコよく言うと、非線型空間電荷効果が働いた場合にエミッタンスが悪化する。ただし、できるだけエミッタンスが悪化しないような分布を作ることにはできる。

この空間電荷効果は、電子ビームのエネルギーが大きくなると急激に減少します。エネルギーが大きくなると、電子同士の電場による反発力とは別に、磁場による吸引力が現れ、反発力を弱める働きをするからです。ちなみに、光速では反発力と吸引力は完全につりあうので、電子同士は反発しなくなります。

RF 電子銃では、熱陰極型 DC 電子銃に比べてエネルギーが高いので、もともとエミッタンスは悪化しにくい。更に、レーザーによって電子分布等を工夫してエミッタンス増大をうまく抑えてやることができれば、その後は小さなエミッタンスを維持したまま加速できるのです。

4. 低エミッタンス達成のためにやっていること

RF 電子銃は、SPring-8 の Linac の様に多くのパラメータはありません。現 Linac のバンチャ出口までに相当するビームを、以下のパラメータ設定のみで生成することができます。

RF cavity への入力パワー、RF cavity への入力 RF 位相、レーザーパルス幅、レーザースポットサイズ、スポット形状、レーザーパワー、ビーム収束用ヘルムホルツコイルの励磁量。

ただし、空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑えるために、レーザースポットサイズの調整、レーザーの強度分布の調整、RF 入力位相の調整、コイル励磁量の調整等を行ってやる必要があります。前述のように、レーザー内の強度分布を考慮するだけでもエミッタンスの悪化が少なくなるように設定することができるわけですが、これらパラメータは電子ビームの電荷量によっても最適値が異なってきます。また、これらパラメータの選び方に確立したものがあるわけではありません。したがって、シミュレーションを行って低エミッタンス維持のための最適解を探し、そのパラメータで実験を行うという方法をとっています。

5. normalized emittance

SPring-8 で得られている実際の最小エミッタンスは、 0.1nC/bunch のとき $2\pi\text{mmrad}$ です。このエミッタンスは normalized emittance です。

エミッタンスは保存すると述べましたが、電子ビームを加速すると実際には小さくなります。これは、電子が広がろうとする方向の運動量は保存したままで、進行方向の運動量だけを増加させてやる（進行方向に加速するということ）と、結果的に電子が広がろうとする角度が小さくなるからです。異なるエネルギー同士のビームのエミッタンスを比較するために、ビームを加速してもエミッタンスの値が保存する normalized emittance という量が定義されています。これは、楕円の面積に $\gamma\beta$ を掛けたものです。

SPring-8 蓄積リングのエミッタンスは 6nmrad です。リングの流儀では、エミッタンスと言うと生のエミッタンスを示すようです。これを normalized emittance に直すと、 100mmrad 程度になります。したがって、RF 電子銃で得られるビームのほうが、エミッタンスが良いことになります。

6. SPring-8 での実績

SPring-8 でのエミッタンスの実績を、図 3 に示します。実験時のレーザースポットサイズは、 $\phi 1.0 \sim \phi 2.0$ です。シミュレーションは、レーザースポットサイズごとに示しており、完全には一致していませんが傾向は一致しています。世界トップのエミッタンスを実現しているのはアメリカの BNL で、 $0.8\pi\text{mmrad}@0.5\text{nC/bunch}$ と報告されています。日本でトップは住友重機械工業で、 $1.5\pi\text{mmrad}@0.3\text{nC/bunch}$ 程度です。SPring-8 はこれらに比べると悪い値ですが、日本では住重の次に良いエミッタンスを実現しています。ただし、我々のエミッタンス測定法は住重の方法と違うために単純な比較はできません。また、SPring-8 では計算によって予測したパラメータを用いて計算どおりの低エミッタンスを実現していますが、他所ではこうした予測はできていないのが現状です。

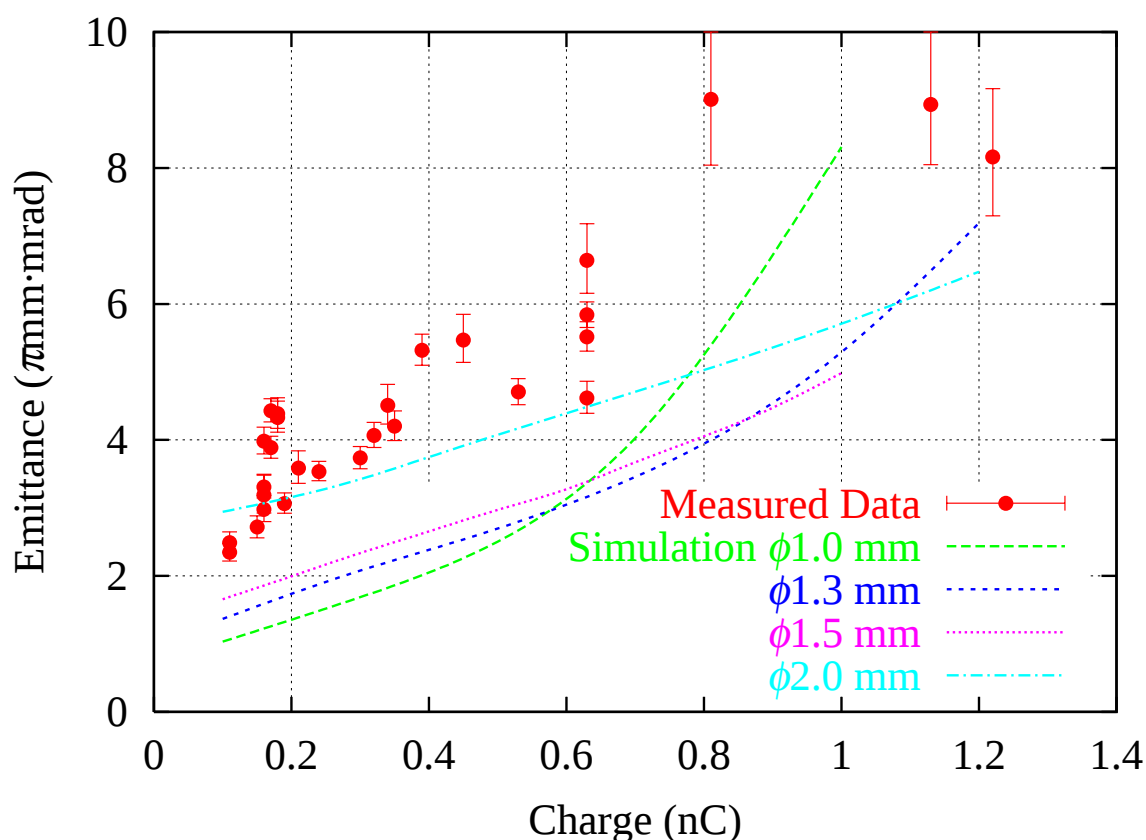


図 3 SPring-8 でのエミッタンス実測データ