

KEK-ATF における CSR によるエミッタンス増大実験の検討

奥木敏行*、浦川順治、久保浄、黒田茂、田内利明、早野仁司
高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 つくば市大穂 1-1

概要

低エミッタンスビームを低中エネルギー領域において偏向させると、ビーム自らが放射増幅するコヒーレント放射光 (CSR) の影響で、ビームのエミッタンスが増大する現象が提唱されている。この CSR によるエミッタンス増大はリニアコライダーや SASE-FEL におけるバンチ長圧縮部において影響を与えると懸念されている。現在おこなわれている CSR に対する研究は、自由空間での CSR によるエミッタンス増大の定量的な検討や完全導体の平行平板を運動するビームに対する遮蔽効果が理論的に検討されているだけである。実際の加速器での CSR の確認や、実際の加速器で使われている真空ダクトでの遮蔽効果の検証に関しては計画段階の施設が数力所存在するが、実際に検証された例は未だ無い。KEK-ATF ダンピングリングは水平方向エミッタンスが 2 nmrاد と世界でも例を見ない低エミッタンスビームを安定に作り出せるため CSR の検証には最適な加速器である。本稿では KEK-ATF における実験に対する検討結果を報告するものである。

1 コヒーレント放射光 (CSR)

1.1 CSR ポテンシャルとエミッタンス増大

電子ビームが偏向電磁石を通過するとき、シンクロトロン放射光を放出する。このシンクロトロン放射光はビームの進行方向に対して $1/\gamma$ 程度の広がりを持ち光速で伝搬する。一方、電子ビームは偏向電磁石内では円弧を描くように進むため、放射光に対して長い軌道長を進むことになる。このため、ビーム内の後方の電子が放出した放射光はビーム内の前方の粒子へと到達し、放射光の電磁場と相互作用し、放射光は増幅されることになる。これが偏向電磁石内での CSR の原理である。

CSR により電子ビームはエネルギーを失うことになる。この失われるエネルギーは wake field のようにポ

テンシャルを使って表わすことができる [1]。

$$V_{\text{CSR}}(s) = -\frac{2Ne}{\sqrt{2\pi}^3 \sqrt{3\rho^2 \sigma_z^4}} F(s/\sigma_z) \quad (1)$$

ここで $F(s/\sigma_z)$ は図 1 で表わされるようになる。 σ_z はバンチ長、 ρ はビームの曲率半径を表わしている。CSR によるポテンシャルは wake field の場合と違い、その性質上ビームの前方により大きな影響を与えることがわかる。またポテンシャルの大きさはビームエネルギーに依存しないため、ビームエネルギーが高くなると CSR の効果は無視されるので、CSR は低中エネルギー領域で大きな効果を与えるということがわかる。また、このようなビーム内のエネルギー変調がシケイン内などのアクロマートな系の中で起こると、系の出口では、ビームの一部でアクロマートな条件が破れ、結果として水平方向のエミッタンス増大を引き起こすことになる。

1.2 真空チャンバーの遮蔽効果

今まで述べてきた話は全てビームの近くに導電体など電磁場を乱す障害物が存在しない自由空間内での電子ビームの運動についてだった。しかし、実際の加速器ではビームは真空チャンバーの中を運動し、真空チャンバーは導電体でできているため遮蔽効果を与える。この遮蔽効果については高さ h の完全導体からなる平行平板に対しての計算がなされている [2]。遮蔽効果の起こる条件は

$$\sigma_z > \frac{h}{\pi} \sqrt{\frac{3h}{2\pi\rho}} \quad (2)$$

であり、この遮蔽効果に対する実効的な遮蔽長は $\sqrt{h\rho}$ 程度とされる。また、この拡張として高さ h 、幅 w の真空チャンバーを通過する際の遮蔽効果を

$$\sigma_z > \sqrt{\frac{h^2 w}{\pi^2 \rho}} \quad (3)$$

と見積もることもある。しかし、この式には 2、3 倍程度の不定性があり、正確に確かめられたものではない。

2 KEK-ATF に設置可能なバンチ長圧縮装置

2.1 KEK-ATF で生成されるビーム

KEK-ATF は文部科学省高エネルギー加速器研究機構内で運転されている次世代のリニアコライダーのための試験加速器である。KEK-ATF から取り出されるビームの主なパラメーターを表 1 にまとめる。ビームエミッタンスは水平方向で 2 nmrاد、垂直方向 20 pmrad と世界でも最小の値を出している。また、一度リングを通

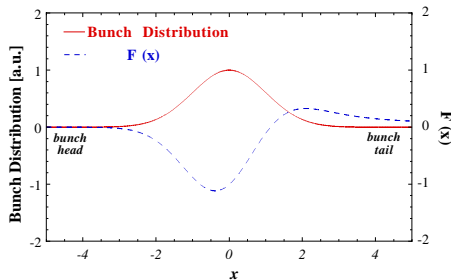


図 1: CSR のポテンシャル。ここでは真空ダクトの遮蔽効果は入れていない。

* E-mail: toshiyuki.okugi@kek.jp

表 1: KEK-ATF ダンピングリングを出たビームのパラメーター。表の値はビーム内電子散乱の効果も含めたビーム強度が 1×10^{10} のときの値を示してある。

ビームエネルギー	E	1.28 GeV
ビーム強度	N_e	1×10^{10}
水平エミッタンス	ε_x	2 nmrad
垂直エミッタンス	ε_y	20 pmrad
バンチ長	σ_z	7 mm
運動量拡がり	σ_p/p	0.85 %

しているため、RF 電子銃などで生成されるビームに比べても安定性も良く、ビームテールも少ない。またビームエネルギーも 1.28GeV とさほど高くない。これらのことを考慮に入れると KEK-ATF は CSR の試験を行なうのに良いビームを供給できる加速器であることがわかる。

2.2 バンチ圧縮装置の設計

装置の単純化を考えるため、ここでは 90° 回転型のバンチ圧縮装置を考えることにする。ここで言う回転角は縦方向位相平面（ビーム進行方向の位置とエネルギーのずれ）での回転角を意味する。 90° 回転型のバンチ圧縮装置はビームの進行方向に依存したエネルギー差を形成する空胴部とエネルギーが違ふ粒子の軌道長を変える偏向部とで構成される。空胴部は現在 KEK-ATF リニアックで使用している S-band 加速管を使用することを仮定する。式 (1) でもわかるように、バンチ長は短ければ短いほど CSR ポテンシャルは大きくなるが、圧縮できるバンチ長には空胴部や偏向部での非線形特性からくる制限がある。

90° 回転型のバンチ圧縮装置前でのビーム進行方向の位置 Δz_i と圧縮装置後のビーム進行方向の位置 Δz_f との関係は

$$\begin{aligned} \Delta z_f = & \left(1 - \frac{kR_{56}VC}{E-VS}\right) \Delta z_i \\ & - \frac{k^2 R_{56} \{V(1+2C^2) - ES\}}{2(E-VS)^2} \Delta z_i^2 \\ & + \frac{k^3 R_{56} VC(E+8VS)}{6(E-VS)^2} \Delta z_i^3 + o(\Delta z_i^4) \end{aligned} \quad (4)$$

のように表わせる。ここで $k = 2\pi f/c$, $S = \sin \delta$, $C = \cos \delta$ である。式 (4) の第 1 項、第 2 項が空胴にかける高周波の電圧と位相を調整してキャンセルすることはできる。しかし第 3 項は消すことのできない値として残ってしまう。この第 3 項がバンチ長圧縮の制限値を作ることになる。この非線形の効果を見捨てるための条件として

$$2\sigma_{z,f} = 2R_{56} \frac{\sigma_{p,i}}{p} > \Delta z_f(2\sigma_{z,i}) \quad (5)$$

と置き、表 1 のパラメーターを使うと、S-band 高周波空胴を使ったときのバンチ長圧縮の限界値として $850\mu\text{m}$ という値が求められる。また、このときの基本パラメーターを表 2 にまとめる。

表 2: バンチ長圧縮装置の基本パラメーター。

空胴周波数	f	2856 MHz
空胴電圧	V	21.4 MeV
空胴位相	φ	2.87°
運動量縮約因子	R_{56}	1.00 m
最終バンチ長	σ_z	$850\mu\text{m}$

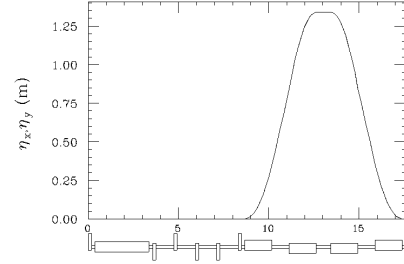


図 2: KEK-ATF に導入可能なバンチ圧縮装置のビームラインと運動量分散関数。

表 2 のパラメーターを基に設計されたビームラインを図 2 に示す。このようなバンチ長圧縮装置を実現するためには空胴部は現在 KEK-ATF で使用している 3m の加速管 1 本で充分である。また偏向部は 1.35T の磁場をかけた 1.5m 長の rectangular 型の偏向電磁石 4 個からなるシケインによって構成されている。偏向電磁石磁場を大きくとったのは CSR の効果を大きくとるためと真空チャンバーの遮蔽長を短くすることにより装置を簡略化するためである。また、シケイン中央の運動量分散関数は最大 1.25m と大きく、このときの水平方向のビームサイズは約 1cm となるため、シケイン中央部でのチャンパー系は充分大きくとる必要がある。

3 CSR の定量的評価

3.1 トラッキングコード

CSR の影響を調べるために 6 次元のトラッキングコードの開発をおこなった。マクロ粒子モデルで粒子トラッキングをおこなう手法でコードは形成され、CSR の影響は式 (1) のポテンシャルによるエネルギーの変化として織り込んだ。その結果、真空チャンバーによる遮蔽効果については採り入れられないが、ビームラインを設計する上では、遮蔽効果の無い状態を最悪の状態として捉えることができ、エミッタンス増大の上限値を求める上では、充分であると考えることができよう。また、このコードには CSR のみでなく、シンクロトロン放射光や wake field の影響も織り込んである。

3.2 水平方向エミッタンス増大の評価

水平方向エミッタンスの増大は上記のトラッキングコードを用いておこなわれた。理論的には最終のバンチ長は $850\mu\text{m}$ であったが、トラッキングの結果最終バンチ長は $1088\mu\text{m}$ という結果となった。これは図 3 に示すよ

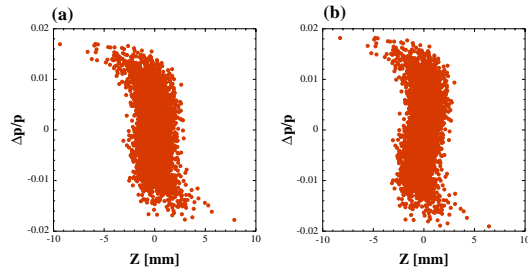


図 3: パンチ圧縮装置で圧縮されたビームの縦方向の位相空間。(a) 解析的に解かれたパラメータを使った位相空間 (パンチ長 $1088\mu\text{m}$)。 (b) パンチ長が最短になるように調整した後の位相空間 (パンチ長 $977\mu\text{m}$)。

うに 3 次の非線形の影響によるものである。また若干のパラメータの微調により図 3(b) に示すようにパンチ長を若干小さくすることができる。

水平方向エミッタンスの増大はシケイン部のビーム光学系により変化する。図 4 にはシミュレーション例を示す。図 4 (a) には運動量分散関数を、(b) にはベータ関数を、(c) にはビームラインに沿った規格化水平方向エミッタンスの変化を示している。なおシケイン中央部におけるエミッタンスの上昇はクロマティックな収差からくるもので、CSR の影響が無いときにはシケインの出口部分では完全にゼロになるものである。しかしながら、CSR の影響でシケインを出た後もエミッタンスの増大が存在していることがわかる。また図 5 は $\alpha_x = 0$ の条件を保ちながら水平方向ベータ関数を変化させたとき、シケイン出口に於ける規格化エミッタンスをシケイン中央部分でのベータ関数の関数として表わしたものである。水平方向ベータ関数を変化させることによりシケイン出口でのエミッタンスの値を変化させることができることがわかる。このように幾つかのビーム光学系において、水平方向のエミッタンス増大を調べることにより CSR におけるエミッタンス増大が正しく理解されているかを判断することができる。

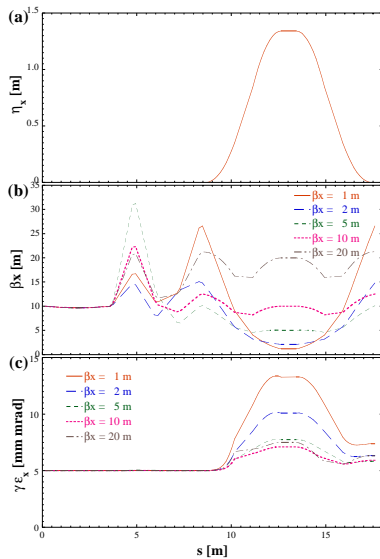


図 4: トラッキングコードによりシミュレートされたエミッタンス増大。(a) 運動量分散関数。(b) ベータ関数。(c) エミッタンス増大の様子。

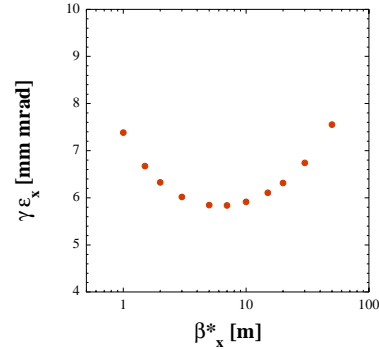


図 5: ビーム光学系の違いによるエミッタンス増大の変化。シケインの中央で $\alpha_x = 0$ として、そこでのベータ関数 β^*_x を変えながらエミッタンス増大をシミュレートした。

3.3 遮蔽効果の影響

遮蔽効果の影響は式 (2)、(3) を使って評価することができる。シケインに使われている偏向電磁石の曲率半径は $\rho = 3.16\text{m}$ 、パンチ圧縮装置の最後部でのパンチ長は約 1mm なので、式 (2) により遮蔽効果を及ぼすために必要な真空チェンバーの高さは $h = 4.0\text{cm}$ 程度であることがわかる。また実効的な遮蔽長も $h = 4.0\text{cm}$ のとき約 35cm となり、最後の偏向電磁石の出射部において、このような縦方向へ変化するコリメーターを設置することにより遮蔽効果についても確かめることが可能である。式 (3) についても同時に調べるためには水平方向へも変化するコリメーターを作成せねばならず多少複雑な装置が必要になるが、原理的に不可能なことではない。

4 まとめ

KEK-ATF のビームに対する CSR の検証、および、真空ダクトでの遮蔽効果の検証に対する検討をおこなった。検討の結果、真空チェンバーによる遮蔽効果を考慮に入れないとした場合、水平方向のエミッタンスが 15–50% も上昇することがわかった。このエミッタンス増大はビーム光学系の設計により値が変化し、この変化を注意深く調べることにより CSR によるエミッタンス増大を詳しく調べられることもわかった。更に真空チェンバーによる遮蔽効果は真空チェンバーの高さが 4cm 程度と比較的実現しやすい程度の大きさから起こり、可変式のコリメーターを作成することにより詳しく調べられることもわかった。これらの考察から KEK-ATF は CSR の検証には最適な加速器であると結論づけられる。

5 謝辞

本稿を書くにあたり ATF-II ミーティングに参加して、共に議論して下さった方々には大変有意義なコメントを多く頂いた。ここに感謝申し上げます。

6 REFERENCES

- [1] Y.S.Derbenev et al., TESLA-FEL 95-05(1995).
- [2] S.A.Kheifets et al., CERN SL-95-92(1995).