

CSR EFFECT AT XFEL-TO-STORAGE RING BEAM TRANSPORT LINE, SPring-8

Takahiro Watanabe^{1,A)}, Masaya Oishi^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Yuichi Okayasu^{A)}, Noritaka Kumagai^{B)}
Shigeki Sasaki^{A)}, Masazumi Shoji^{A)}, Kouichi Soutome^{A)}, Masaru Takao^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}
Kenji Fukami^{A)}, Takahiro Fujita^{A)}, Chikaori Mitsuda^{A)}, Hiroto Yonehara^{A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198 Japan

^{B)} RIKEN XFEL Joint Project/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148 Japan

Abstract

A 300-meter long beam transport line will be built from the XFEL C-band linac to the existing 8 GeV storage ring at the SPring-8. The beam transport line is supposed to deliver femtosecond electron bunches with high peak current, being composed of 14 bending magnets and quadrupoles. Current status of the transport line construction plan is briefly presented. Since Coherent Synchrotron Radiation (CSR) could degrade a beam quality in such a transport line with multiple bends, tracking simulation on the effect has been employed to analyze the effect in the transport line. As a result, it was found that the CSR effect would not be negligible unless some modification would be made to either an electron bunch distribution or a lattice of the beam transport line. The numerical result on the CSR effect as well as a proposal to compress femtosecond bunches by positively utilizing CSR effect is shown.

SPring-8 XFEL-蓄積リングビーム輸送系におけるCSR効果

1. はじめに

現在、SPring-8サイトには、8GeVの電子蓄積リングおよび、この入射系として1~1.2GeV S-band Linacおよび1GeVから8GeVにRamp-upするBooster synchrotronがある。更に現在、同サイト内にX線領域の自由電子レーザー(XFEL)が建設中である。このXFELの主加速部は、最大8GeVのC-band linacであり、ここで生成された電子ビームがXFEL用のUndulatorを通過することでX線領域のFEL発振がされる。

更に、理研/JASRIでは、現存の蓄積リングのUpgrade planを検討する次期計画ワーキンググループを発足させ、2009年6月19日、東京で第1回目の次期計画シンポジウムを開催した。

このような背景の下、本ProceedingのタイトルにもなっているXFEL-to-Storage ring beam transport line(以下、XSBT)の建設が進んでいる。これは、XFEL C-band linacで生成される電子ビームを上記Undulator前にBending magnetにて切り出し、蓄積リングに輸送する電子ビームラインである。当面の目的は現存の蓄積リングへ高品質(低エミッタンス、短バンチ)なビームを打ち込むことであり、将来的には次期計画と絡む可能性もある重要な輸送系である。

XSBTは次のような経路を辿る。XFEL C-band linacから水平方向に曲げられ、その後、XFELよりも低い位置にあるBooster synchrotronに向けて下方に曲げられる。その後、Booster synchrotronの直線部の

横を併行して走り、最後にSynchrotron-to-Storage ring beam transport line(SSBT)に合流する。

本稿において「XSBT」とは、XFEL C-band linacの振り分けマグネットから、SSBT合流点までと定義する。従って、SSBTからStorage ring入射点までは含まれない。

このXSBTは、現存のSSBTとは異なり、合計14台ものBending magnetにてビームは水平方向・垂直方向に蹴られ、更に高ピーク電流値を持つ電子ビームがそこを通過する。現在の見積もりでは、XSBT入射位置で300pC/100fs程度が想定されているため、ピーク電流は3kAに達する。更に、最新の計算では30fs程度のビーム発生も見込まれている。従って、Coherent Synchrotron Radiation(CSR)がXSBTを通過する電子に及ぼす効果について定量的に評価する必要があり、Tracking simulation codeであるELEGANT^[1]を用いてこの評価を行った。CSR効果の概要については、次章で簡単に述べる。

2. CSR効果

電子が曲げられる際にSynchrotron radiation(SR)を発するが、このSRは非常に広い幅のスペクトルを有する。通常のGeVレベルの蓄積リングを周回する電子が発するSRは、短波長側は硬X線領域から、そして長波長側は遠赤外線領域までの幅広いスペクトルを持つ。

さて、放射の種類に関わらず、電子バンチ長よりも長い波長の光はコヒーレント性を有することが知

¹ E-mail: twatanabe@spring8.or.jp

られている。これは、各電子の発する光の位相が揃うためであり、その全強度は、インコヒーレント放射の場合が1電子の発する強度の電子数(N)倍であるのに対し、コヒーレント放射の場合は、N²倍になる。SRも例に漏れず、波長の長い成分はコヒーレント性を示す。このような放射をCoherent Synchrotron Radiation (CSR)と呼ぶ。

昨今、このCSRが輸送中の電子ビームの質を悪化させる現象について研究が進んでいる。つまり、Bending magnet内で発せられたCSRが幾何学的に自分自身の電子バンチに追いつき、電子のエネルギー偏差を与えるのである^[2]。

$$\frac{dE(z)}{dz} = \frac{N \cdot r \cdot mc^2}{\rho^{2/3} \cdot \sigma_z^{4/3}} F\left(\frac{z}{\sigma_z}\right) \quad (1)$$

$$F(x) = -\frac{2}{3^{1/3}} \int_x^\infty \frac{x' dx'}{(x-x')^{1/3}} \frac{e^{-x'^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

(各変数の意味は[2]参照)

このエネルギー偏差は、分散が存在する場所において電子分布の偏差へと変換され、ビームの質を悪化させる。

3. ELEGANTによるCSR効果の計算

3.1 Lattice

XSBTのLatticeは、妻木、深見ら(共にJASRI/SPring-8)によって計算され、最初のBendから垂直キックまではDouble-bend achromat、Booster Synchrotronのレベルまで落とした後の輸送はFODOにより組まれた。同LatticeをELEGANTによって計算した結果を図1に示す。以下のCSR計算は、このLattice構成に基づいて行われている。

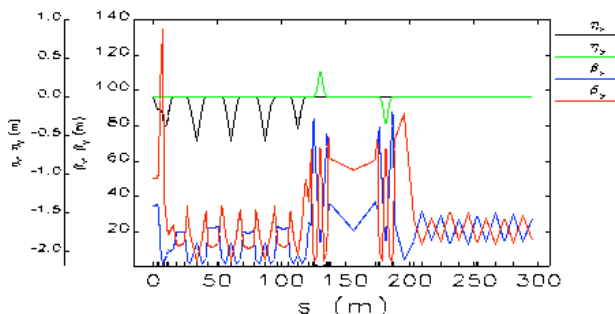


図1 XSBTのベータ関数および分散

3.2 Elegantによる計算と理論計算との比較

まず、Bending magnet 1台というシンプルな系において、ELEGANTによるCSR計算と、式(1)(2)による計算結果を比較した。計算パラメータは、電子エネルギー8GeV、RMSバンチ長 $\sigma_z=100\text{fs}$ 、電荷量300pC、磁場長1.69m、磁場1.6T。比較結果を図2に示す通り、概ね両者は一致した。

計算粒子数についても確認した結果、最低5万粒

子で概ね計算が可能であることを確認したため、以下の計算は全て5万粒子で行った。

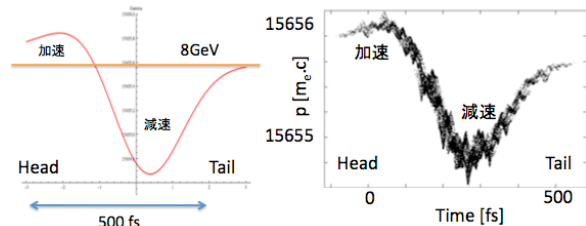


図2 CSR理論計算(左)およびELEGANTによる計算(右)。左右は同スケール。

3.3 ELEGANTによるCSR計算

XSBTを通過する電子バンチがCSRによってどれだけ影響を受けるかについて、ELEGANTを用いてシミュレーションを行った。この際、空間電荷効果は計算に入っていないが、電子ビームが8GeVということから無視できるほど小さいと考えられる。

また、ElegantにCSR計算は、Saldin氏の1次元モデル(電子分布を1次元の線密度分布としてCSR効果を見積もったモデル)^[3]に基づいて計算されており、これにおける制限等については、参考文献[4]を参照されたい。

XFEL C-band linacによって生成される電子バンチは、エネルギー分布も時間分布もガウシアンではないが、ここでは簡単のためガウシアン分布を仮定した。電子バンチ幅、入射エネルギー拡がりについては、それぞれ30fsおよび100fs(共にRMS)、0.01%および0.1%(RMS)についてParameter surveyを行った。エミッタンスは、X、Yともに40pm.rad(規格化で0.64 mm.mradを用いた)。

図3は、エネルギー拡がり0.01%の時の計算結果である。図中、左側は入射電子バンチ長が30fsの場合、右側は100fsの場合。本LatticeはR₅₆がゼロではないため、CSRがない場合(図3の上2図)においても、R₅₆×ΔE/Eだけバンチ長は伸び、入射バンチ長が30fsの場合の方がXSBT出口でのバンチ長は短い。

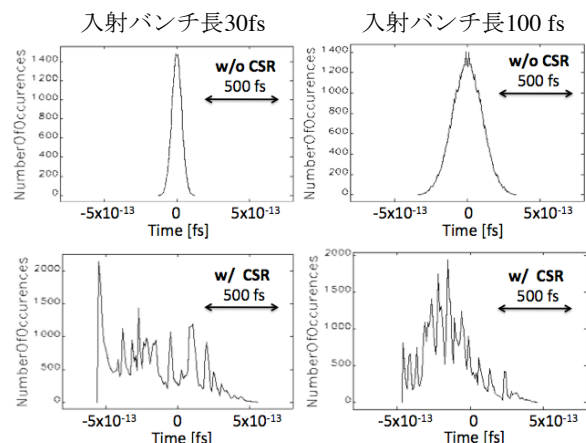


図3 CSR効果によるバンチ長の伸び

一方、CSRの効果を含めると、バンチ長の伸びが著しい。しかも、30fsの方が出射バンチが長い。これは、30fsの方がCSR効果が大きいためである。

図3より、ある閾値より短いバンチは、むしろバンチ長を伸ばすことがわかる。そこで、入射電子バンチ長を変えながら出射バンチ長を測ったところ、入射バンチ長が200~300fs程度になってはじめて出射バンチ長が同程度の長さになることがわかった。

しかしながら、バンチ長が伸びる前にエネルギー拡がりは悪化している。そこで、図4に入射バンチ長が300fsの時の時間方向分布および位相空間分布をプロットした。

図4からわかる通り、入射バンチ長が300fs程度の時、出射バンチ長はCSR込みでも同程度になるが、エネルギー拡がりは数倍になっている。このエネルギー拡がりは、SSBTや蓄積リングのアクセプタンスで受けきれない可能性があり、注意が必要である。なお、紙面の都合でここまでエネルギー拡がり0.01%の時についてのみ示したが、0.1%の時についても計算を行い、常に0.1%の時の方がCSRの効果が抑制されるという結果を得た。これは、XSBT上流におけるDispersionによって、エネルギー拡がり0.1%のバンチは伸長を起こしているためである。

CSR効果によって、電子バンチ全体としてはエネルギーロスが生じる。そこで、式(1)(2)およびXSBTのパラメータ（バンチ長100fs、電荷量300pC）を用いて1つのDipoleによるエネルギーロスを計算し、これをDipole数分だけ足し合わせた合計のエネルギーロスを計算すると、XSBT全体では0.05%のエネルギー減少となった。一方、ElegantによってXSBT全体のエネルギーロスを計算すると、0.5%となり、理論計算よりも1桁多くなった。これは、CSR効果によってXSBT上流で急峻なスパイクが発生し、CSR効果が更に高まっているためであると考えられる。

3.4 CSRを用いた極短バンチ発生 の提案

CSRは極短バンチ生成・維持に悪影響を及ぼすものとして知られ、通常はいかにCSR効果を抑制しな

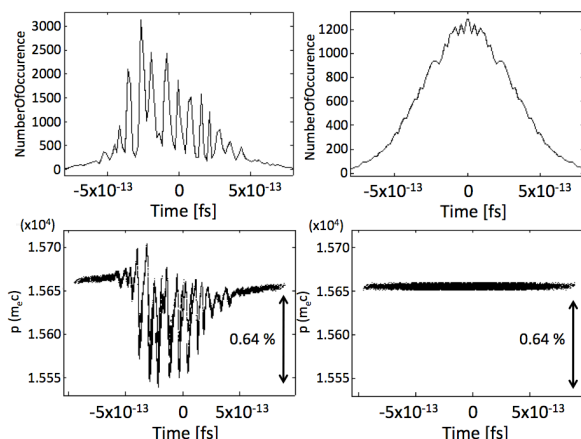


図4 入射バンチ長300fsの時の時間方向・位相空間分布。With CSR (左)、w/o CSR (右)

がらバンチ圧縮を行うかが検討される。しかし、ここではCSRを積極的に用いたバンチ圧縮法を提案する。

この圧縮法は、予めRFなどによるEnergy chirpを必要とせず、かつ通常の極短バンチ圧縮に生じる「CSRによるバンチの質の悪化」を改めて考慮する必要がないため、ピーク電流の高いフェムト秒の電子バンチ圧縮も可能である。

本圧縮法としては、Positive R_{56} とNegative R_{56} を使う2つの方法があると考えられるが、ここでは、XSBTをそのまま利用するため、Negative R_{56} （我々の定義において）を用いた圧縮例を示す（図5）。CSRによるエネルギー変調と R_{56} を適切に調整することにより、入射バンチ長100fs rms（半値幅で235fs）が、XSBTにおける5つ目のDipole magnet出口で半値幅29fsまで圧縮されている。図5からもわかる通り、Tail部分が存在するが、Coherent放射を取り出す場合、Pump-and-probe実験を行う場合などは無視できる可能性もある。ただし、Emittance growthやEnergy拡がりが同時に起きていることは注意が必要である。

今後、蓄積リング入射部での最適化などを検討していく予定である。

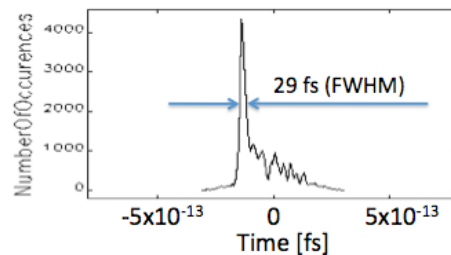


図5 CSRによる極短バンチ圧縮

4. まとめ

SPring-8において現在計画が進行しているXSBTラインにおけるCSRの影響について、計算コードELEGANTを用いて評価した。その結果、バンチ長が300fs以下で入射した場合、現状のLatticeに何らかの修正を加えない限りはバンチ長が300fs程度まで伸びるという結果を得た。また、いずれにしてもCSRによるエネルギー拡がり/エネルギーロスと下流のアクセプタンスとの整合性に注意を払う必要があることが定量的に確認された。

また、CSRを能動的に使い、極短バンチ更に短くする手法を提案し、実際に計算を行った。その結果、XSBTの途中において1桁程度（約30fsに）バンチ長が短くなることを示した。

参考文献

- [1] M. Borland, Advanced Photon Source LS-287, Sept. 2000.
- [2] 横谷馨, ERL入門;OHO'03 (2003).
- [3] E.Saldin et al., Phys. Res., Sect. A **398**, 373 (1997).
- [4] M. Borland, PRST-AB **4**, 070701 (2001).