

SuperKEKB入射器におけるCSR由来のシンクロベータトロン結合 CSR INDUCED SYNCHRO-BETATRON COUPLING IN THE SuperKEKB LINAC

由元崇[#], 周徳民, 飯田直子, 清宮裕史, 菊池光男
Takashi Yoshimoto[#], Demin Zhou, Naoko Iida, Yuji Seimiya, Mitsuo Kikuchi
High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

High-charge, low-emittance electron and positron beams are crucial to the SuperKEKB injector, which has several complicated bending beam transports such as the J-arc section. In these sections, there are finite momentum dispersions, and synchro-betatron coupling oscillations generally occur due to beam energy modulation with Coherent Synchrotron Radiation (CSR). In this paper, we report the shielded CSR effects on beam transverse emittances with its bunch charge dependence.

1. はじめに

SuperKEKB 入射器では高電荷・低エミッタンス電子(陽電子)ビームを供給する必要がある、放射光によるビーム品質の劣化を定量的に見積もることが重要となる。一般に電子(陽電子)ビームを偏向磁石で曲げるとインコヒーレントシンクロトロン放射光(Incoherent Synchrotron Radiation, ISR)が発生し、ビーム品質が劣化することが知られている。近年この放射光の低周波成分により発生するコヒーレントシンクロトロン放射光(Coherent Synchrotron Radiation, CSR)もシンクロベータトロン結合により横方向ビームエミッタンスの増大に寄与することがわかり、活発に研究されている[1, 2]。本稿では主に SuperKEKB 電子入射器における CSR 由来のビームエミッタンス増大について報告する。

SuperKEKB 入射器は KEK つくばキャンパスの敷地制限により J-Arc (Fig. 1) と呼ばれる 180 度偏向ビーム輸送路を含む折り畳み型線形加速器(Folding linear accelerator)となっている。この種の線形加速器はコンパクトさゆえに低コストで建設できるという利点がある。ハドロン線形加速器においては FRIB (Facility for Rare Isotope and Beams) [3] がこの設計思想に基づいて建設されている。ただし電子(陽電子)加速器では、この偏向ビーム輸送路内

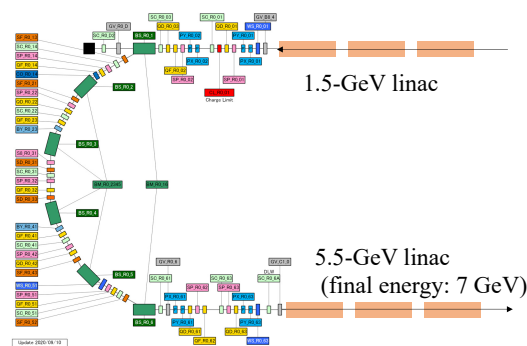


Figure 1: Schematic of the 1.5-GeV 180-degree bending beam transport (J-Arc) in the SuperKEKB 7-GeV electron linear accelerator. J-Arc has six bending magnets (BMR01~BMR06) from upstream.

[#] yoshimo@post.kek.jp

で発生した放射光がどのようにビームへ影響するのかを考慮しておくことが重要となる。実際~2 nC の電子ビームにおいて、J-Arc 前後における規格化ビームエミッタンスは水平方向で~10 から~50 $\pi \cdot \mu\text{m} \cdot \text{rad}$ 、垂直方向で~14 から~60 $\pi \cdot \mu\text{m} \cdot \text{rad}$ と増大していることがワイヤスキャナを用いたエミッタンス測定で確認されている。またビーム加速終了後に SuperKEKB 衝突リング入射用 7 GeV ビーム輸送路における横方向エミッタンス増大も観測されている。

2. CSR 効果によるビームエネルギー変調

CSR 効果の計算モデルは多岐にわたるが、今回の計算ではいわゆる平行平板モデル(Steady-state parallel-plate CSR model)を用いた(詳細な式は文献[4]の Appendix を参照されたい)。このモデルは水平偏向電磁石内の金属ビームダクトの上下壁(全幅 h [m])によって CSR 場が遮蔽される効果を含んでいる。ビームがみる縦方向インピーダンスは Fig. 2 に示されるが、この図からわかるようにビームダクト幅に依存して遮蔽効果が存在していることがわかる。

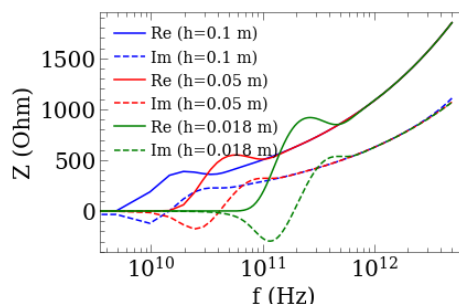


Figure 2: Longitudinal CSR wake impedances with different full gaps of the duct ($h = 0.1, 0.05,$ and 0.018 m) corresponding to a 2-m J-Arc bending magnet with a bending radius of 3.64 m.

具体例としてバンチ長の異なる($\sigma_z = 0.75, 0.075$ mm)ビーム(1.5 GeV, 1 nC, ガウシアン分布)の場合の CSR エネルギー変調を Fig. 3 に示す。Figure 3(a)に示すようにビームダクト幅によってビームエネルギー(運動量)変調が大きく異なることがわかる。 h が大きくなるにつれて遮蔽効果が弱まり、 $h = 0.1$ m では自由空間における CSR 効

果とほぼ一致する。一方でビーム長が極端に短い場合には遮蔽効果は弱まり $h = 0.1, 0.05, 0.018$ m において大きな違いはない。一般にビームパルス長が短くなる(ビームスペクトルの高周波成分が大きくなる)と遮蔽効果が低減することがわかる。また実際に CSR によるエネルギー変調が寄与するかどうかはビーム全幅ではなくビーム内部に存在する局所的かつ急峻な電流ピーク幅によって決まる。

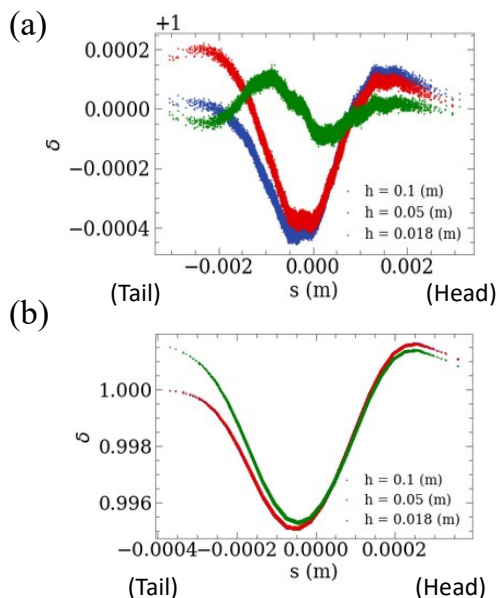


Figure 3: CSR-driven energy modulations with different duct heights ($h = 0.1, 0.05,$ and 0.018 m) of a 1-nC 1.5-GeV beam with a beam length of (a) 0.75 mm and (b) 0.075 mm through one J-Arc bending magnet.

3. 数値シミュレーション

数値計算コード ELEGANT[5]をもちいて SuperKEKB 電子入射器におけるビームの振る舞い(粒子数:50000)を計算した。初期粒子分布にはガウシアン分布(エネルギー13MeV、水平(垂直)方向規格化ビームエミッタンス $\varepsilon_{nx/y} = 10 \mu\text{m}$ 、運動量拡がり $\sigma_\delta = 0.01$ 、ビーム長 $\sigma_z = 0.75$ mm、ビーム量 2 nC)をもちいた。加速管で発生する縦横ウェイク場[6]の影響は計算されているが、電磁石と加速管の設置誤差は考慮されていない。加速管ウェイク場によるビーム運動量拡がりを最小化するよう加速 RF 位相は -86 度(クレスト位相: -90 度)とした。また各偏光磁石を 100 分割して、ステップ毎に CSR によるエネルギーキックをビームにあたえることで CSR 効果を考慮した。この計算では CSR により J-Arc 前後において水平方向でエミッタンスが $\sim 150\%$ 増大するが、垂直方向では顕著な増大はしないことがわかった。J-Arc 前後のビーム位相空間分布 (Fig. 4) をみると、水平方向のビーム位相空間 ($x-x'$) 分布がガウシアン分布から変化しており、エミッタンス増大が生じていることがわかる。また J-Arc では等時オプティクス ($R_{56} = 0.3$) を採用しているため、縦方向ビーム位相空間 ($z-\delta$) 分布が変形しており、CSR 効果に影響を及ぼす。ビーム電流密度分布とともに、各偏光磁石で発生した CSR ウェイク場を Fig. 5 に示す。偏光磁石 BMR03 と BMR05 で発生する CSR ウェイク場の最大振幅値を比

べると後者のほうが最大で約 10 倍大きく、 ~ 0.5 MeV に達することがわかる。これはビーム内部に局所的かつ急峻な電流密度があることに起因している。この箇所における縦方向のビーム位相空間分布をみると一部のビームが運動量方向軸に対して平行な配置になっていることがわかる。

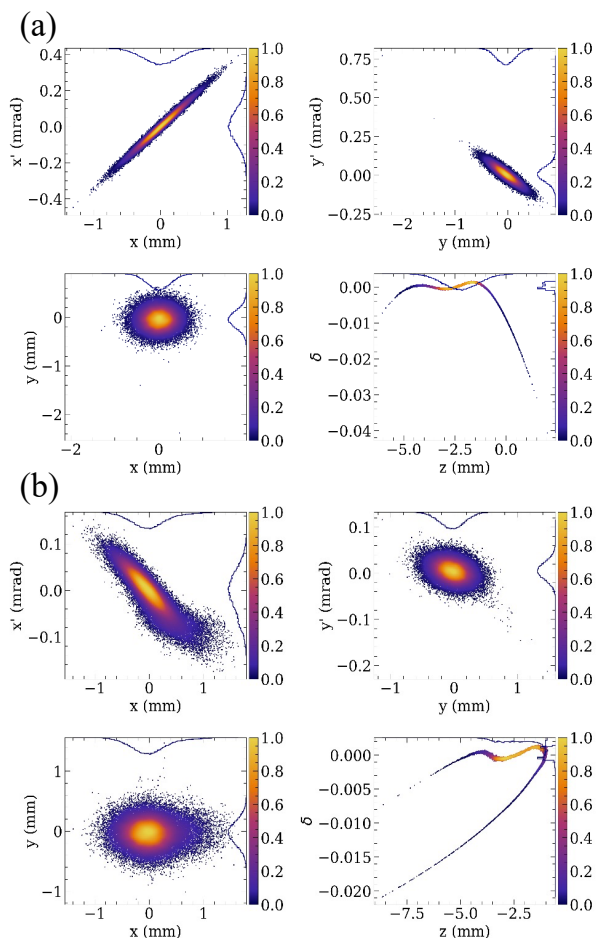


Figure 4: Beam phase space distributions (a) before and (b) after the J-Arc section.

運動量分散関数の大きい箇所での強力な CSR 由来のエネルギー変化が発生すると縦方向の運動が横方向に影響を及ぼす(シンクロトロン結合)ので水平方向のエミッタンスが増大する。結果として J-Arc 下流において水平方向ビームの位相空間 ($x-x'$) 分布は非ガウシアン [Fig. 4 (b)] になる。

次にビーム量 2 nC における入射器から SuperKEKB 衝突リング入射点までの数値シミュレーション結果を Fig. 6 に示す。加速管内における横方向エミッタンスの増大はほぼないが、線形加速器とリング入射点をつなぐビーム輸送路 (BT) において更なる水平エミッタンスの増大が

Table 1: Normalized Transverse Beam Emittance at BT1/ BT2

Direction	Measurement	Simulation
Hor.	$\sim 30 / > 100 \sim 120$	26/129
Ver.	$\sim 20 / 50 \sim 100$	12/12

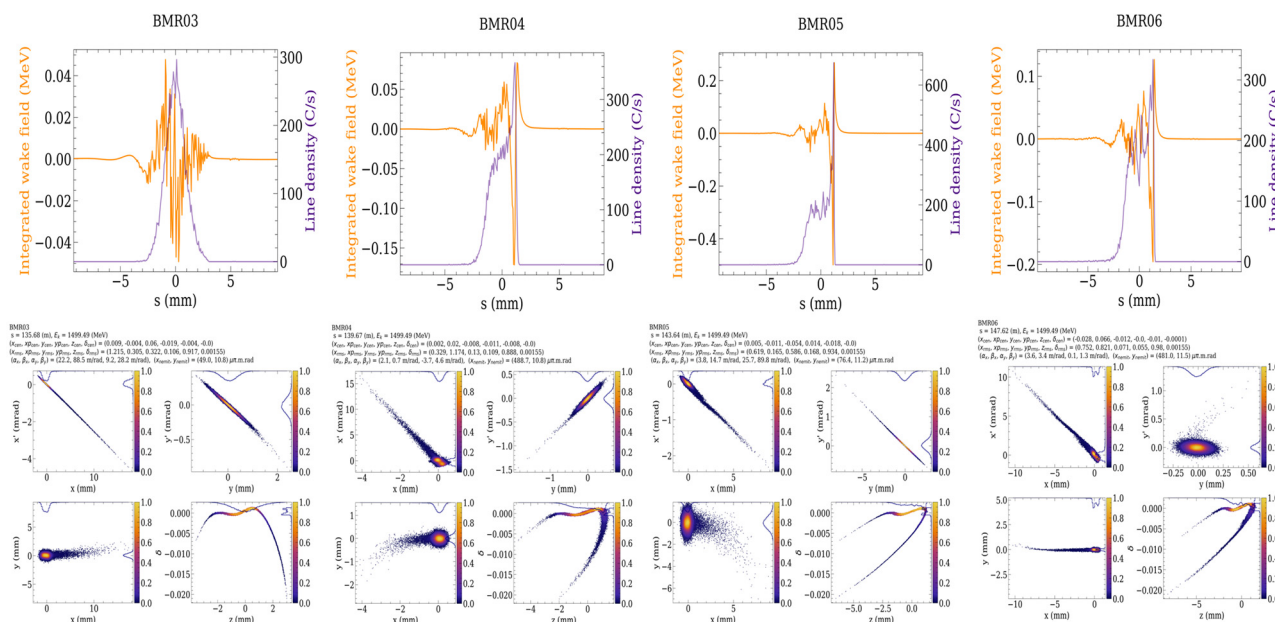


Figure 5: Longitudinal CSR wake fields (top) and phase space distributions (bottom) at the exit of J-Arc bending magnets (BMR03~BMR06). Note that the CSR fields are integrated along the beam path of each magnet.

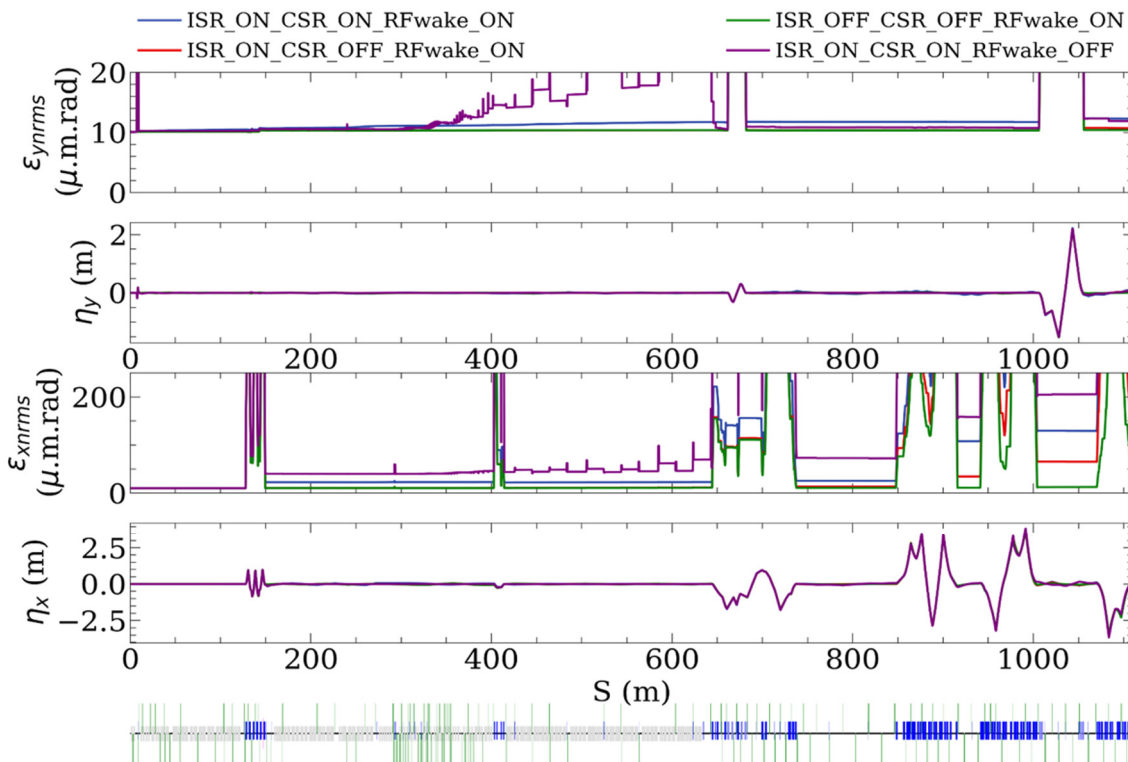


Figure 6: Evolution of transverse emittances in the SuperKEKB electron injector (simulation). Vertical normalized emittances and dispersions, and horizontal normalized emittances and dispersions are shown from the top to the bottom. The blue line indicates the nominal case (bunch charge: 2 nC) with ISR, CSR, and RF wake effects. Other colored lines depict different parameter cases for comparison.

CSR 効果により生じることがわかった。
 また注目すべきことは CSR 効果他に ISR 効果も同程度に水平エミタンスの増大に寄与していることがわ

かった。この原因の一つは BT のある地点において曲率半径の小さい偏向電磁石を使用していることである。Table 1 に BT 内における二つのアクロマット直線部 (BT1,

BT2)における典型的なエミッタンス測定値をシミュレーション値とともに示す。水平方向は両直線部において定量的に再現できているが、垂直方向は再現できていないので今後さらに研究をすすめていく必要がある。またビーム量 2 nC では加速管の RF ウェイクが水平エミッタンスの低減に寄与していることもわかった。

4. まとめ

SuperKEKB 電子入射器において CSR 効果による横方向ビームエミッタンスへの影響を評価した。その結果ビーム輸送においてビーム内に局所的かつ急峻な縦密度変化が生じると、その CSR 効果により水平エミッタンスが増大することが数値シミュレーションにおいて示された。この結果は、定性的に測定結果とある程度一致している。今後より詳細な CSR 解析およびビーム光学の最適化をすすめていきたい。

謝辞

SuperKEKB リング・入射器グループおよび三菱電機システムサービス(株)運転員各位の多大な支援に感謝いたします。

参考文献

- [1] 島田 美帆, “コヒーレントシンクロトロン放射光とビームダイナミクス”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'08, Tsukuba, Sep. 2-5, 2008.
- [2] S. Di Mitri, “Coherent Synchrotron Radiation and Microbunching Instability”, *Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Free Electron Lasers and Energy Recovery Linacs*, Hamburg, Germany, 31 March-10 June 2016, Geneva, 2018.
- [3] J. Wei *et al.*, “The FRIB project – accelerator challenges and progress”, *Proceedings of HIAT 2012*, Chicago, IL USA.
- [4] T. Agoh and K. Yokoya, “Calculation of coherent synchrotron radiation using mesh”, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, Vol. 7, 054403 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.7.054403
- [5] M. Borland, “elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation”, Advanced Photon Source LS-287, September 2000; Y. Wang and M. Borland, “Pelegant: A Parallel Accelerator Simulation Code for electron Generation and Tracking”, *Proceedings of the 12th Advanced Accelerator Concepts Workshop*, AIP Conf. Proc. 877, 241 (2006).
- [6] Y. Seimiya *et al.*, “Investigation of beam variation and emittance growth simulation with both misalignments and the beam jitter for SuperKEKB injector linac”, *Proceedings of IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, TUPAB005, pp. 1304-1307.