

SPring-8 蓄積リングへの極短バンチビームの輸送

TRANSPORT OF ULTRASHORT BUNCH TO THE STORAGE RING IN SPRING-8

深見健司 *^{A),B)}、大石真也 ^{A),B)}、大熊春夫 ^{A)}、大竹雄次 ^{B)}、岡安雄一 ^{A),B)}、小路正純 ^{A)}、
早乙女光一 ^{A)}、渡川和晃 ^{B)}、原 徹 ^{B)}、藤田貴弘 ^{A)}、満田史織 ^{A)}、渡部貴宏 ^{A),B)}

Kenji Fukami*^{A),B)}, Masaya Ooishi^{A),B)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Yuji Ohtake^{B)}, Yuichi Okayasu^{A),B)}, Masazumi Shoji^{A)},
Kouichi Soutome^{A)}, Kazuaki Togawa^{B)}, Toru Hara^{B)}, Takahiro Fujita^{A)}, Chikaori Mitsuda^{A)}, Takahiro Watanabe^{A),B)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), ^{B)}RIKEN

Abstract

A beam transport line is being designed to transport an ultrashort bunch from SACLA to the storage ring at SPring-8. An electron beam will be transported by using a new transport line (XSBT, 300 m) and original transport line (SSBT, 298 m). In XSBT, to avoid bunch lengthening and emittance growth due to dispersions and CSR, all the magnets of bending sections were arranged by Chasman-Green lattice. In SSBT, however, the bunch lengthening is not negligibly small, because most part of the line were arranged by FODO lattice. Therefore, the beam optics of SSBT was redesigned to suppress the bunch lengthening. In this result, a parameter R_{56} was suppressed to 0.272 m from the original value of 1.060 m. The bunch lengthening was simulated by tracking code "ELEGANT". If the bunch length at the extraction point of SACLA was assumed to be 1 ps in rms, the bunch lengthening was estimated to be 1.84 ps for the original optics and 0.53 ps for the new optics without the CSR. With the CSR, the bunch lengthening was effectively suppressed for the new optics under the condition of a bunch charge of 150 pC.

1. はじめに

SPring-8 キャンパス内で稼働中の SACLA 用線型加速器では電子ビームを 8 GeV まで加速し、加速器の下流に設置されたアンジュレータにより X 線レーザを共振させる。効率よく共振させるため、加速器の出射電子ビームのバンチ長は 25 fs、エミッタンスは 0.08~0.14 nmrad (規格化エミッタンス 0.4~0.7 π mm-mrad) を達成している^[1,2]。これらの値は、現状の蓄積リングの値、バンチ長 13 ps、水平方向エミッタンス 2.4 nmrad^[3] に比べて 2 桁程度小さい。

一方、SPring-8 では蓄積リングのエミッタンスを大幅に小さくするための改造を計画中である。改造後の蓄積リングに SACLA のビームを入射し、現状よりさらに高輝度且つ短パルス放射光の発生を目指している。SACLA からのビームは、新規のビーム輸送ライン (from the XFEL Facility to the Booster Synchrotron Beam Transport Line, XSBT, 300m) を通してブースタシンクロトロンの出射点付近まで輸送し、その後、蓄積リングまでの既設のビーム輸送ライン (from the Booster Synchrotron to the Storage Ring Beam Transport Line, SSBT, 298m) で蓄積リングまで輸送する (Fig. 1 参照)。ブースタシンクロトロン内のビームラインの高さは、SACLA、蓄積リングのビームラインの高さに比べて 9 m 低く設計されている。このため、双方の輸送ラインとも水平方向偏向部だけでなく垂直方向偏向部も有する。

新規の XSBT ではバンチ長の伸びを極力抑制するため、水平、垂直方向偏向部は全て Chasman-Green 型ラティスで構成されており^[4]、今年の 9 月にコミッションを開始する予定である。これに対し、既設の SSBT では、偏向部の大部分は FODO 型ラティスで構成されているため、現状のままではこの区間でのバンチ長の伸びは無視できない。このため、SSBT について偏向部の

ラティスの見直しを行い、バンチ長の伸びの抑制効果についてシミュレーションを行った。

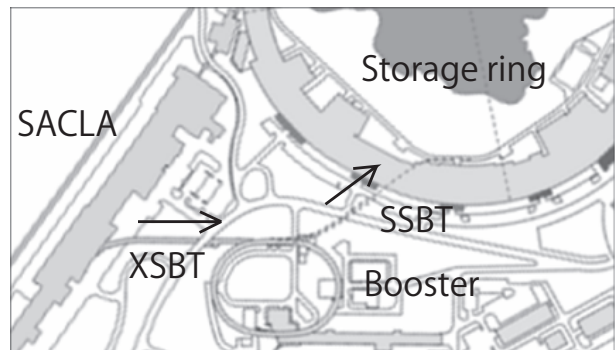


Figure 1: Layout of the accelerators at the SPring-8 campus. An electron beam will be transported by using XSBT and SSBT from SACLA to the storage ring.

2. リニアオプティクス計算

SSBT の概略図を Fig. 2 に示す。水平方向偏向電磁石は、蓄積リング入射用セプタム電磁石 4 台を含めて 16 台 (図中、黒丸) である。垂直方向偏向電磁石は 2 台 (図中、黒丸白抜き) である。四極電磁石は 42 台 (図中、黒十字) である。

水平方向偏向部は Fig. 2 に示すよう Section 1~3 の 3 つの区間に分かれており、各セクションでの偏向電磁石の台数は、Section 1 が 6 台、Section 2 が 4 台、Section 3 がセプタム電磁石を含む 6 台である。各セクションでは、両端の偏向電磁石で分散を発生、消滅させているため、セクション以外の場所では分散は 0 である。垂直方向偏向部 Section V も 2 台の偏向電磁石で分散を発生、

* fukami@spring8.or.jp

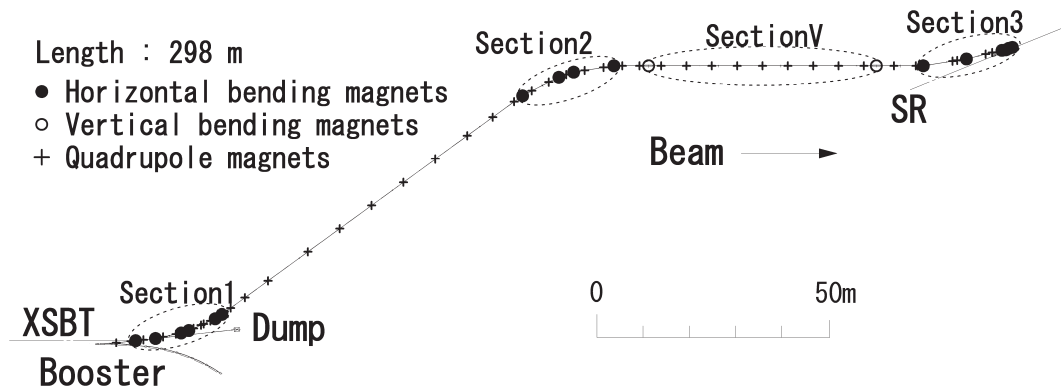


Figure 2: Outline of the SSBT. Broken lines indicate bending sections.

消滅させている。

輸送ライン上に偏向電磁石があるため、バンチ長が伸びる。バンチ長はパラメータ R_{56} に比例して伸びる。 R_{56} は、次式、

$$R_{56} = \int \frac{\eta(s)}{\rho} ds \quad (1)$$

で表せる。ここで、 $\eta(s)$ は偏向電磁石内の分散分布、 ρ は偏向電磁石の曲率半径である。現状のオプティクスでは、両端以外の偏向電磁石内で 1 m を超える分散があり、これが原因で R_{56} を大きくしていた。

そこで、両端以外の偏向電磁石内で分散が極力小さくなるよう四極電磁石のパラメータを調整した。但し、現状のユーザ運転の機能を全て保持するため、条件として、

- 既設偏向電磁石の設置位置、偏向角は変えない。
- 既設四極電磁石の設置位置は変えない。
- 必要最低限の新規四極電磁石の追加のみ行う。

とした。垂直方向偏向部は両端の偏向電磁石しかないため、分散の調整は行わなかった。分散の調整後、上記のセクションとその上下流数十 m をマッチング区間として、それ以外の場所でのベータ関数値を現状の値と一致させた。また、蓄積リングの入射点でのベータ関数値、及び分散も現状の値と一致させた。

3. 計算結果

現状の SSBT と分散調整後の SSBT について、分散とベータ関数の計算値を Fig. 3 に示す。Section 2 では、最初の偏向電磁石で発生した分散を次の偏向電磁石ですぐに消滅させるよう調整できたので、 R_{56} の値は §2. で示した条件での最小値とすることができた。Section 1 では、最初の 2 台は上記と同じ調整ができたが、下流の 3、4 台目、及び 5、6 台目の間の距離が 0.44 m しかないため、この間に四極電磁石を置くことができない。このため、3、4 台目の 2 台で発生した分散を 5、6 台目の 2 台で消滅させた。

Section 3 では、最下流のセプタム 4 台の間の距離はそれぞれ 0.2 m、0.2 m、0.35 m であり、やはり四極電磁石を置くことができない。蓄積リング入射点での分散を $\eta = \eta' = 0$ とするためには、セプタム入り口での分

散は、 $\eta = 0.265$ m と一義的に決まるので、最初の偏向電磁石で発生した分散を次の偏向電磁石で消滅させることができない。このため、次の偏向電磁石の入側、出側の分散は、それぞれ $\eta = 1.129$ m、1.206 m となった。これらの値は、§2. で示した条件で、四極電磁石の磁場勾配を現実的な値とした場合の調整し得る最小の値であった。

分散の調整を優先したので、ベータ関数は現状よりも大きくなり、水平方向では Section 1 で最大 $\beta_x = 130$ m、垂直方向では Section 2 で最大 $\beta_y = 155$ m となった。しかしながら、SACLA からのビームのエミッタンスが 0.08~0.14 nmrad であることを考慮すると、SSBT フィジカルアパーチャ、35 mm の範囲内に十分おさまるものと考えられる。

最終的に得られた R_{56} の値をセクション別に Table 1 にまとめた。新規のオプティクスでの R_{56} の合計値は、XSBT での合計値 0.046 m よりは大きいですが、現状の合計値の 26% に抑制できた。新規に四極電磁石の追加が必要な場所は 6 箇所であった。既設の四極電磁石のうち最大定格を超えてしまったものが 3 台あった。定格を超えたものについては、磁極長の長い新規のものに交換し、既設のものは追加が必要な場所に移動するようにすれば、新規に製作が必要な四極電磁石は 6 台であることが分かった。

Table 1: Calculated R_{56} for the bending sections.

Bending Section	Original	New
Section 1	0.372 m	0.078 m
Section 2	0.446 m	0.051 m
Section 3	0.228 m	0.129 m
Section V	0.014 m	0.014 m
Total	1.060 m	0.272 m

4. 考察

4.1 バンチ長の伸び

偏向電磁石で電子が曲げられる際に発生する放射光のうち、バンチ長よりも波長の長い成分はコヒーレン

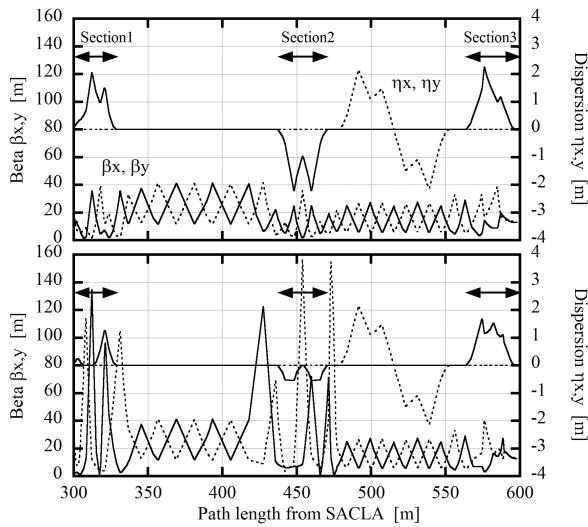


Figure 3: Beta and dispersion functions of the SSBT. Upper and lower figures show these values for the present optics and for new optics, respectively. Solid and broken lines indicate these values in horizontal and vertical directions. Arrows indicate positions of horizontal bending sections.

ト性を示す。この成分を Coherent Synchrotron Radiation (CSR) と呼ぶ。バンチ長は分散だけでなく、CSR によっても伸びる。

偏向電磁石で発生する CSR は、その発生源である電子バンチに幾何学的に追いつき、バンチ内のビーム進行方向にエネルギー偏差を与える。エネルギー偏差を $dE(s)/ds$ とすると、

$$\frac{dE(s)}{ds} = \frac{Nr_e mc^2}{\rho^{2/3} \sigma_s^{4/3}} F\left(\frac{s}{\sigma_s}\right) \quad (2)$$

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

で表せる [5]。ここで、 N は電子数、 r_e は古典電子半径、 σ_s はバンチ長である。偏向電磁石を通過するたびにエネルギー広がりが増えるため、分散によるビーム進行方向の変形はエネルギー広がりをもとに一定と仮定した場合とは大きく異なる。

そこで、SACLA 出射ビームのビーム軸方向のプロファイルをガウシアン分布と仮定して、CSR 有無によるバンチ長の変化をトラッキングコード ELEGANT により計算した [6]。SACLA 出射ビームのバンチ長が短いほど、CSR によるバンチ長の伸びが顕著となり、結果的に蓄積リング入射部でのバンチ長は逆に長くなる場合のあることが分かった。このため、輸送できる現実的値として、バンチ長を $\sigma_s = 1$ ps とした。エネルギー広がりを $\Delta E/E = 0.05\%$ 、バンチ電荷を 150 pC とし、シミュレーションに使用する粒子数を 50,000 とした。

CSR を無視した場合、SSBT のオプティクスが現状のままである場合、蓄積リング入射部でのバンチ長は 2.0 ps となった。これに対し、新規のオプティクスを採用した場合、蓄積リング入射部でのバンチ長は 1.1 ps と

なった。これらの値は、 R_{56} から推定されるバンチ長の伸び、1.84 ps、0.53 ps と矛盾なく一致した。CSR を考慮しても、新規のオプティクスでは 1.1 ps であり (Fig. 4 参照)、現状のオプティクスの場合の 1.9 ps に比べてバンチ長の伸びを抑制できる事がわかった。

4.2 エミッタンスの増大

CSR によりエミッタンスも悪化する [5]。SACLA 出射部でのエミッタンスが小さいほど CSR によるエミッタンスの増大は顕著になる。そこで、先に示した現状のエミッタンスより更に厳しい条件として、SACLA 出射ビームのエミッタンスを $\epsilon_x = 60$ pmrad とした。その他の条件は §4.1 と同じとして、水平方向のエミッタンスの増大について計算した。

蓄積リング入射部での水平方向エミッタンスは、現状のオプティクスの場合 71 pmrad、新規のオプティクスの場合 64 pmrad となった。新規オプティクスを採用することによって、少なくともエミッタンスの悪化は見られないことがわかった。

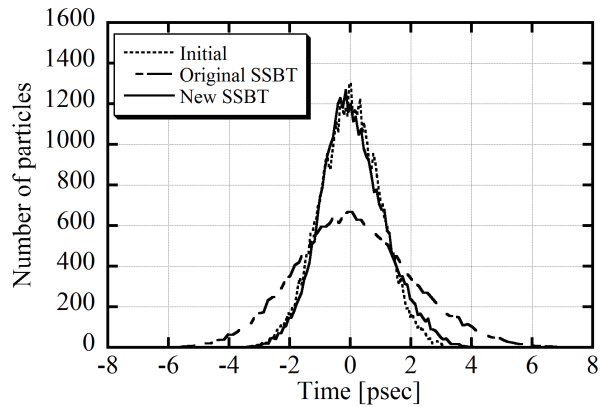


Figure 4: Simulated beam intensity distributions in longitudinal direction with the CSR. Solid and chain lines indicate the distributions at the injection point of the storage ring by using new optics and by using original optics, respectively. Broken line indicates the distribution at the extraction point of the SACLA.

5. まとめ

既設の輸送ラインに四極電磁石を 6 台追加することにより、バンチ長 1 ps のビームを問題無く輸送できることが分かった。新規オプティクスによるエミッタンスの増大も無視できるほど小さいことが分かった。

参考文献

- [1] T.Hara, et.al., "PROGRESS IN SACLA OPERATION", Proceedings of 34th International Free Electron Laser Conference (FEL2012), Nara, Japan, 2012. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2012/papers/moob03.pdf>
- [2] T.Tanaka, et.al., "CHARACTERIZATION OF LIGHT SOURCE PERFORMANCE AND UPGRADE OPTION AT SACLA", Proceedings of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, 2012, Japan.

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEUH/WEUH08.pdf

- [3] Y.Shimosaki, et.al., "New Optics with Emittance Reduction at the SPring-8 Storage Ring", Proceedings of 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC'13), Shanghai, China, 2013. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/mopea027.pdf>
- [4] C.Mitsuda, et.al., "The Construction Status of Beam Transport Line from XFEL-linac to SPring-8 Storage Ring", Proceedings of 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC'11), San Sebastian, Spain, 2011. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/thpc144.pdf>
- [5] 横谷 馨, ERL 入門, OHO'03, 2003. <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2003/txt-2003-6.pdf>
- [6] M.Borland, "elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation", Advanced Photon Source LS-287, September 2000.