

BASIC DESIGN OF BEAM PARAMETERS FOR XFEL/SPring-8

Toru Hara¹, Kazuaki Togawa, Hitoshi Tanaka

SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

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

Abstract

A single pass FEL in the X-ray region (XFEL) requires a high energy, high brightness electron beam. The XFEL under construction at SPring-8 uses a thermionic pulsed electron gun with a single crystal cathode, which can produce a 0.5 μ m-mrad electron beam at 1 A. After the gun, the electron beam is compressed by a factor of 3000 using a velocity bunching and three magnetic bunch compressors. In this report, we describe the basic design of the electron beam parameters and how to compress the electron beam with maintaining the initial low emittance. The results of the simulation show that the estimated beam parameters satisfy the conditions required for the SASE lasing at 0.1 nm.

XFEL/SPring-8 ビームパラメータの基本設計

1. はじめに

XFELのLINACに要求される高輝度電子ビームを実現するには、電子銃から出る低エミッタンス電子ビームをいかにエミッタンスの増大なくバンチ圧縮し、加速するかが重要である。XFEL/SPring-8では、5 m長の真空封止アンジュレータ18台を用いて、0.1 nm以下の波長でSASEによるレーザー発振を狙うため、電子ビームの規格化スライスエミッタンス1 π mm-mrad以下、ピーク電流3 kA以上が必要となる。

XFEL/SPring-8で用いる入射器部および主要な機器は、2006年に真空紫外領域でのFEL増幅に成功した250 MeV SCSS試験加速器において既に性能試験が行われている[1]。

本報告では、XFEL/SPring-8の機器配置、電子ビーム収束系、およびバンチ圧縮を行うためのRFやBCの概要を紹介する。

2. XFEL/SPring-8の機器配置

図1にXFEL/SPring-8機器配置の概略図を示す。入射器前半は試験加速器とほぼ同じ構成である。電子銃から出た2 μ s-1 Aの電子ビームから、ディフレクターを用いて1 ns分を切り出し、velocity bunchingによってピーク電流20 Aまでバンチ圧縮を行う。その後相対論的エネルギー領域まで加速したビームを、3段の磁気バンチ圧縮器 (BC) で3 kA以上まで圧縮した後、C-band主加速器で8 GeVまで加速し、アンジュレータが並ぶ光源部に入射する。光源部には並列に並んだアンジュレータビームラインが5本置かれ、パターン励磁される振り分け用偏向電磁石によってビームライン間の切換を行う[2]。中央のアンジュレータビームライン手前にはシケインを設置して、C-band主加速器で発生する暗電流を完全に除去し、アンジュレータ磁石の減磁を防ぐ。また将来の

加速器増設用に約16 mのスペースを、C-band主加速器と光源部の間に確保している

2010年のコミッション当初は、5本の内2本のビームラインを設置し、中央の1本は0.1 nm以下の波長でレーザー発振を狙うX線用アンジュレータを、端の1本には長波長領域放射光発生用アンジュレータを置く。この端のラインは、ビーム調整時のビーム廃棄用バイパスとしても用いられる。

XFELで重要なのは、電子バンチの平均パラメータ (投影パラメータ) ではなく、バンチ内でFEL発振を起こすコア部分の局所パラメータ (スライスパラメータ) である。スクリーンを用いたビームサイズ測定や四極電磁石スキュンによるエミッタンス測定など、通常の電子バンチ測定は全て投影パラメータしか測定できない。そこでXFEL/SPring-8では、正確なバンチスライスパラメータを測定し加速器の調整が行えるよう、バンチ圧縮終了後のBC3下流にC-band RFディフレクター (所謂LOLA) を設置する。RFディフレクターはTM11とTE11の混成モードを励起する加速管で、RFゼロクロスに電子バンチをのせることで、電子ビームを垂直方向に蹴り、電子バンチの時間分布 (スライス) に対応した空間分布を下流に置かれたスクリーン上で得ることができる。直接スクリーン上の電荷密度分布を測ることにより、バンチ電流の時間構造がわかる他、四極電磁石スキュンと組み合わせたスライスエミッタンス測定を行うことができる。また上流のBC3中央に設置した四極電磁石を用いて、スクリーン位置でエネルギー分散関数を発生させれば、電子バンチ内エネルギーチャープの時分割測定 (E-T位相空間測定) が可能になる。ここでエネルギー分散関数の生成に偏向電磁石ではなく四極電磁石を使用すると、E-T測定時のビーム中心軌道を通常運転時、即ち加速器中心軸と同一にでき、スクリーン下流の加速管で減速させてビーム廃棄が行える他、BPM等の機器を動かさずにそのまま使用することができる。

¹ E-mail: toru@spring8.or.jp

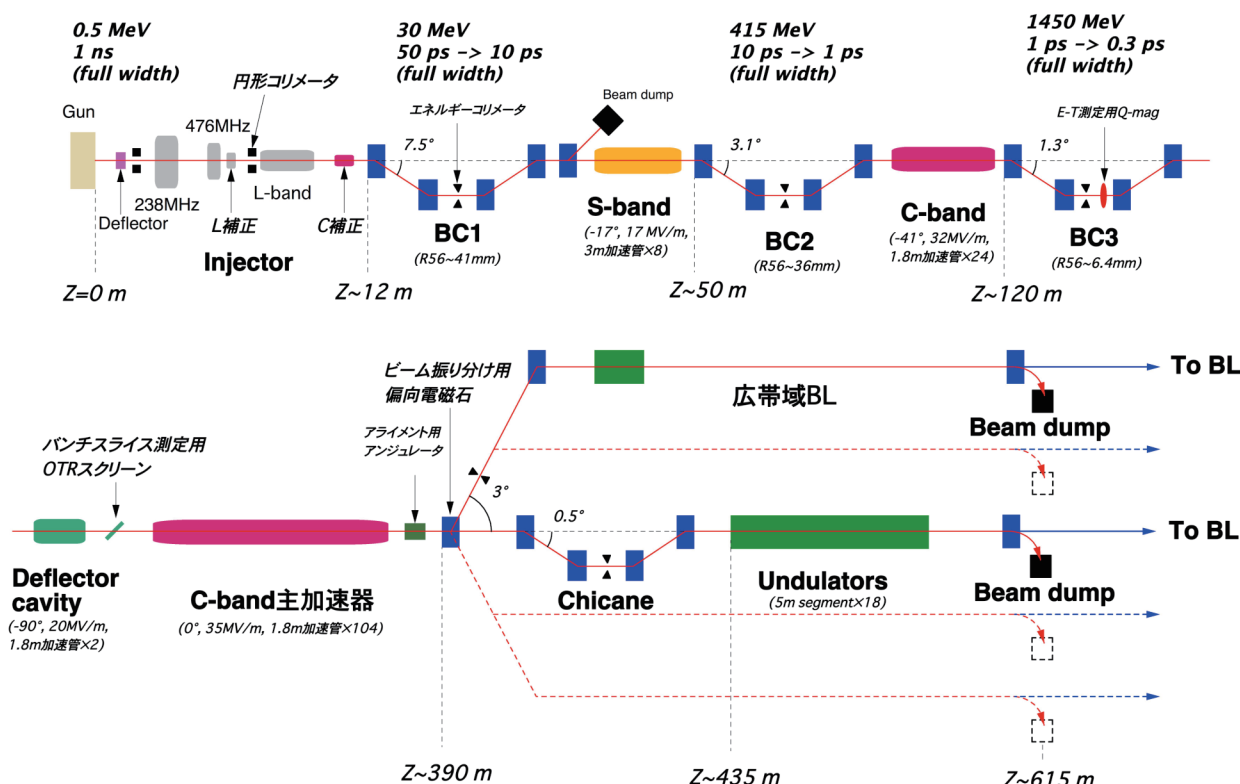


図1：XFEL/SPring-8の機器配置図、赤点線部分は将来設置予定のビームライン。

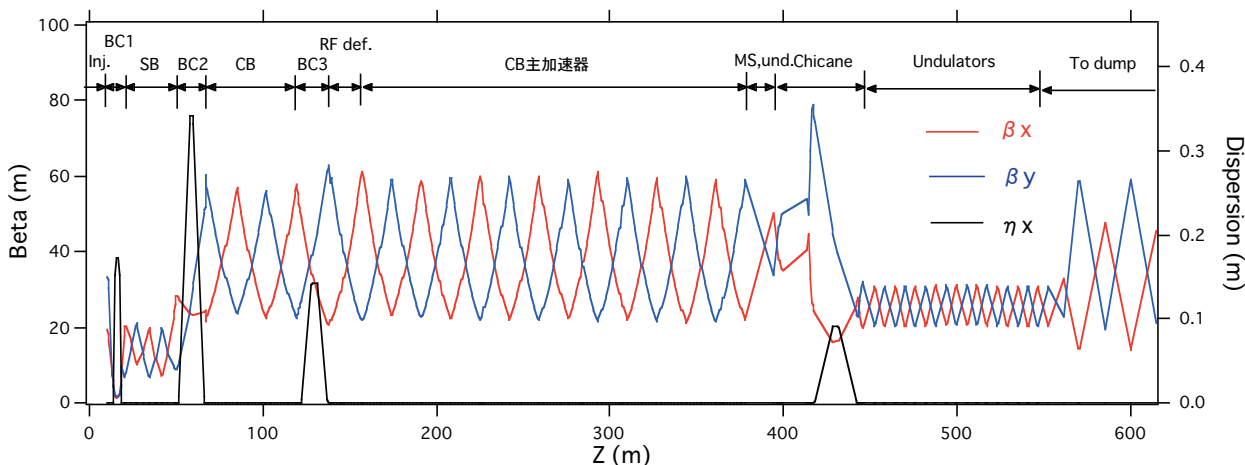


図2：XFEL/SPring-8の電子バンチコアに対するベータ関数とエネルギー分散関数。

3. 収束系の設計

入射部収束系は、離散的に分布させたマグネティックレンズによって構成される。入射部では、電子銃から出た横方向に均一な電子ビームをなるべくビーム径を一定に保ち、更に2箇所円形コリメータによって整形する。横方向ビーム密度分布を極力ハードエッジ均一分布に近づけることで、エミッタンスを悪化させる空間電荷効果の非線形成分を抑制するように配慮した。

L-band加速管以降の収束系には四極電磁石を用いる。XFEL加速器の電子バンチには、バンチ圧縮に

必要な大きなエネルギーチャープが付けられるため、収束系の色収差によりビームサイズがバンチ内で変化する。従ってバンチ全体の平均twissパラメータではなく、バンチコアの部分に対して収束系の最適化を行った。図2にXFEL/SPring-8のベータ関数とエネルギー分散関数を示す。基本的なラティス構造はFODOである。BC部では水平ベータ関数が過度に大きくならないようにし、CSRによるエミッタンスの悪化を避けている。

エネルギー分散関数について注意しなければならないのは、BC部からのエネルギー分散関数の漏れがあると、電子ビームが加速された下流で補正することはできなくなり、そのまま実効的なエミッタンス

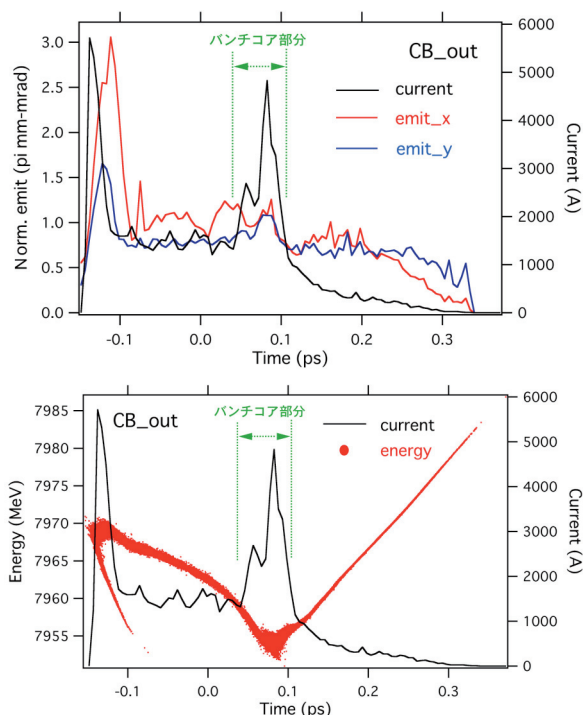


図3：8 GeV加速後の電子バンチ規格化スライスエミッタンス（上）とバンチ内エネルギーチャープ（下）、黒実線はビーム電流を示す。

の増加につながる点である。これを防ぐため、各BCの偏向電磁石にはトリムコイルを設置し、確実にBC下流のエネルギー分散関数を補正する。

4. バンチ圧縮

初段のバンチ圧縮は、電子銃下流の238 MHzと476 MHzのバンチャー空洞で電子バンチ内にエネルギーチャープをつけ、電子の速度差を利用したvelocity bunchingによって行う。その後L-band APS加速管内で更に圧縮し、ピーク電流を20 Aまで上げる。試験加速器ではBCが1段しかないため、velocity bunchingで約1/100にバンチ圧縮しているが、XFEL/SPring-8では空間電荷効果の非線形性によるエミッタンス悪化を最小限に抑えるため、velocity bunchingの圧縮を1/20に設定した。またそれに伴い、試験加速器ではS-bandだった入射器部後半の加速管をL-bandに変更し、電子バンチに対するアクセプタンスを広げ、電子のキャプチャー効率を上げている。

入射器部以降のバンチ圧縮は、電子エネルギーの増加とともにバンチ長を短くため、3段のBCによって行う。BC2と3ではシケインの偏向角を調整することにより、バンチ圧縮率を各々±10%、±30%程度調整できるようにする。各BC部におけるバンチ長の変化を図1に示す。

オーバーバンチングすることなく高いバンチ圧縮率を得るには、RF加速電場やBCの非線形性を補正し、圧縮過程を線形化することが重要である。Velocity bunchingでは、電子銃から出た500 keVの電子を238 MHz空洞の減速位相にのせ、更にL-band補

正空洞を用いて、電子速度のエネルギーに対する非線形性を抑制する。またBC1~3におけるバンチ圧縮過程の線形化は、BC1上流のC-band補正空洞を用いて行う。これらの補正空洞は、加速に用いるRFの整数倍周波数で電子を減速することにより、RF加速電場やBCの2次の非線形性をキャンセルしている。このとき補正空洞の周波数は高い方が、より少ない減速度で非線形性を補正できるため、加速器長に対する加速効率はよくなる。しかしながら、例えばX-bandを補正空洞に用いるには、ハードウェアの開発に費用と時間がかかる。そこでXFEL/SPring-8では、バンチ圧縮を利用した新しい補正方法を採用した[3]。図1に示すC-band補正空洞はBC1上流に置かれ、バンチ圧縮前の長いバンチに対し補正を行う。バンチ圧縮前に補正空洞でインプリントされた非線形補正のためのエネルギーチャープは、バンチ圧縮によって強調される。BC1では1/5にバンチ圧縮するので、BC1前に設置した5.7 GHzのRF補正波形は、BC1後ではバンチ圧縮によって実効的に5.7×5 GHzのエネルギーチャープと同等になる。

バンチ圧縮に関連するRFやBCのパラメータを効率的に最適化するため、1D-simulatorでまずおおよその値を決め、最後に3Dコードで確認を行った。また1D-simulatorを用いてRFに要求される安定性評価も同時に行い、ほぼ試験加速器の結果から実現可能であるという結論を得た[4]。3Dコードは、空間電荷効果が重要な入射器部の計算にはPARMELAを用い、BC1以降はCSRや加速管ウェーク場が考慮されたELEGANTを用いた。8 GeV加速後に得られる電子バンチのパラメータを図3に示す。

5. まとめ

XFELは基本設計が終了し、2010年度完成に向けて建設が始まっている。入射器部やビームモニター、RF機器の安定性等ハードウェアの性能評価は、既に試験加速器において行っており、XFELで要求される性能を満たす目処がついている。ビームパラメータについても、目標とするピーク電流3 kA、規格化スライスエミッタンス 1π mm-mradが達成できることが確認できた。残る課題は、いかにして設計通りの加速器性能を引き出すか、コミショニング方法の具体的検討が重要となる。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "Low Emittance Injector at SCSS", Proceedings of the FEL Conference 2006, pp. 769-776, URL: <http://www.JACoW.org>.
- [2] K. Fukami, et al., "DESIGN OF ELECTRO-MAGNETS FOR XFEL/SPring-8", in these proceedings.
- [3] K. Togawa, et al., "ENERGY CHIRP LINEARIZATION IN BUNCH COMPRESSORS FOR XFEL/SPring-8", in these proceedings.
- [4] H. Tanaka, et al., "BUNCH LENGTH VARIATION AND TIMING JITTER CAUSED BY RF SYSTEM INSTABILITY", in these proceedings.