

DESIGN OF INJECTOR SYSTEM FOR X-RAY FEL AT SPring-8

Hirofumi Hanaki^{1,A)}, Takao Asaka^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Hiroaki Kimura^{A)}, Toshiaki Kobayashi^{A)}, Shisuke Suzuki^{A)},
Toru Hara^{B)}, Atsushi Higashiya^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Noritaka Kumagai^{B)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Yuji Otake^{B)},
Tsumoru Shintake^{B)}, Hitoshi Tanaka^{B)}, Kazuaki Togawa^{B)}

^{A)}JASRI/SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan

^{B)}RIKEN/SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract

The SPring-8 X-FEL based on the SASE process has been developed to generate X-rays of 0.1 nm. The design goals of the slice beam emittance and peak current at the end of the linac are 1π mm mrad and 3 kA, respectively. The injector of the linac generates an electron beam of 1 nC, accelerates it up to 30 MeV, and compresses its bunch length down to 20 ps. We adopted the following keys to toward the goals: 1) A 500 kV thermionic gun (CeB₆) without a control grid ejecting a beam holding the low rms emittance of 0.6π mm mrad, 2) a beam deflector downstream gating the beam to form a bunch of a 1 ns length, 3) multi-stage RF structures (238, 476 and 1428 MHz) bunching and accelerating the beam gradually to maintain the initial emittance, and 4) extra RF cavities of 1428 and 5712 MHz linearizing the energy chirp of the beam bunch to achieve the bunch compression resulting the required peak current.

SPring-8 XFEL 入射部システムの設計

1. はじめに

SPring-8 XFEL計画では、高電界型線型加速器(400m)と真空封止型ミニギャップアンジュレータ(90m)を組み合わせて、波長0.1nmのX線生成を目指しており、2010年完成を目指して建設が続いている。

SPring-8 XFELの最も重要な特徴は、他のSASE-FELではRF電子銃が使用されているのに対し、熱電子銃が用いられることである^[1]。注意深く設計された熱電子銃の場合、電子密度の均一な円柱状の電子ビームパルスを生成する事が可能であり、そのような電子ビームは非線形な空間電荷効果を持たないため、電子ビームのエミッタンスは、カソード面を飛び出した直後の熱エミッタンスをほぼ維持出来る。

この方針の正しさは、SCSS試験加速器のSASE-FEL発振(50nm)成功によって証明された^[2]。そして現在、SCSS試験加速器はXFEL建設のためのマシンスタディだけでなく、先端的な放射光ユーザのために、EUVパルス利用の運用を行っている^[3]。

本XFELがレーザ発振を達成するために必要とされるリニアックのビーム性能は以下の通りである。

ビームエネルギー: 8 GeV

ビームピーク電流: > 3 kA

規格化エミッタンス: < 1π mm mrad

SPring-8 XFELリニアックの入射部は基本的にSCSS試験加速器に基づいて設計されているが、速度バンチングのバンチング比はSCSSの約100から約20に低減し、エミッタンス増加を極力抑えるようにしている。そのため、SCSSで採用されたSバンドAPS空腔をLバンドに変更した。さらにLおよびCバンドの補償RF空腔を導入して、より多くの電子がバンチングされるように設計した。

2. ビームパラメータの設計^[2,4]

入射部設計においてはエミッタンス増加を最小限にするため以下を基本方針とした。

- 均一な電荷分布を持つ円筒形のビームを生成するため、コントロールグリッドを持たないCeB₆単結晶カソードを採用。
- 空間電荷効果によるエミッタンス増加が最小になるよう、多段バンチングシステムを最適化。

2.1 ビームバンチング

本リニアックでは最終的なバンチ圧縮比は3000以上(1A→3kA)になる。この圧縮比を、空間電荷効果あるいはCSR効果によるエミッタンス増加を抑制しつつ達成するため、バンチングセクションをリニアックに分散させ、圧縮比を最適化して配置する。

10MeV以下の低エネルギー域では、三段階の加速空腔によって約1/20に速度バンチングを行う(図1, 2参照)。一方高エネルギー域では、三段階のシケインによる磁気圧縮によって、最終的にピーク電流3kA以上にまでバンチ圧縮を行う(図2, 3参照)。計算された加速電界強度の最適値は表1の通りである。

表 1: RF 空腔の最適電界とシャントインピーダンス

RF Cavity	Gradient/Voltage	Shunt Impedance
238 MHz	198 kV	10.2 MΩ
476 MHz	801 kV	8.5 MΩ
L-Correction	138 kV	9.6 MΩ × 2
L-APS	13.9 MV/m	> 30 MΩ/m
C-Correction	12 MV/m	> 47 MΩ/m

バンチング効率を高め、かつ過剰バンチングを避けるため、図1のように二種類の高調波空腔を設置

¹ E-mail: hanaki@spring8.or.jp

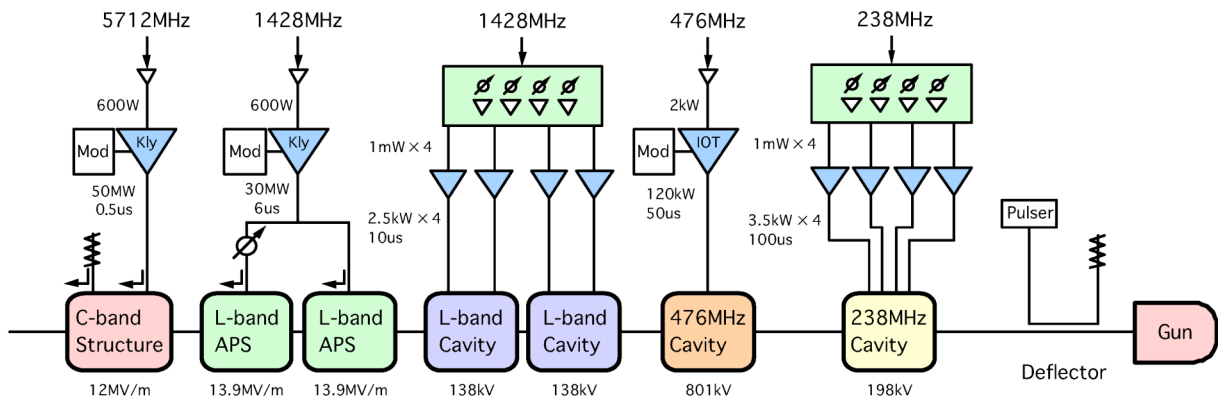


図 1: XFEL入射部のRF系ブロック図

する^[5]。まずLバンド空胴がブースタ空胴のすぐ下流に設置され、ビームにエネルギー変調を与えて後段でのパンチング過程を線形化する。さらにLバンド加速管の下流に短いCバンド進行波管を入れて、下流の磁気圧縮における非線形性を補償している。

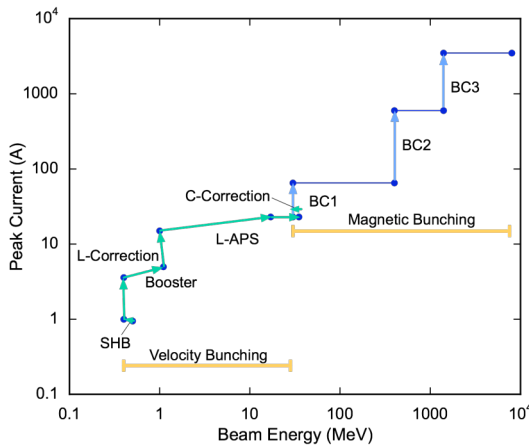


図2: バンチ圧縮のスキーム

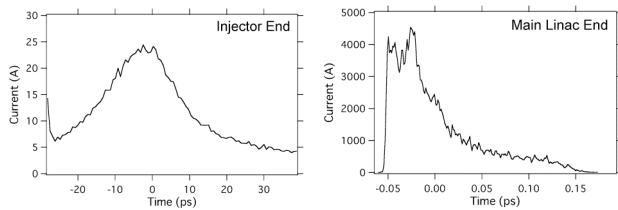


図3: バンチ内電荷分布のシミュレーション結果 (入射部出口および主加速部出口)

2.2 ビーム輸送

入射部のビーム集束には、RF空胴を覆う長いソレノイドを用いず、SCSSと同様にパンケーキ状の薄いソレノイドを、図4のように電子銃からLバンドAPS加速管までの間に10台を分散配置する。これにより、加速・パンチング・集束という三つの機能が分離されてリニアックのビーム調整は飛躍的に容易になる。各ソレノイドの磁場強度は、電子ビーム径がなるべく一定になるように設定し、集束しすぎた場合の非線形空間電荷効果によるエミッタンス増加を避けている。さらに、ビーム整形・ハロー除去のために

ビームコリメータ二個を配置する (図4参照)。

2.3 ビーム安定性

入射部で僅かでもビームが変動すると、アンジュレータでのレーザ発振が不安定になるため、RFシステムは振幅および位相が安定かつ精密に制御出来るよう、非常に注意深く設計する必要がある。表2は、アンジュレータにおいてピーク電流値の変動を10%rms以下に抑制するために必要とされる、入射部RF系安定度の暫定的な計算値である^[6]。

これらの厳しい要求を満たすため、変調器出力電圧の安定化^[7]、低レベルRF制御およびRF空胴冷却水温度制御の高精度化^[8]が進められている。また、1nsビームを成形するビームデフレクタ (後述) のゲートパルスタイミング安定化も行われ、良好な結果を得ている^[9]。

表 2: 各機器に要求される電圧および位相安定度

Devise	$\Delta V/V$ (% rms)	$\Delta\phi$ (deg. rms)
Electron gun	0.003	
238 MHz SHB	0.01	0.01
476 MHz booster	0.01	0.02
L-band correction	0.03	0.06
L-band APS	0.01	0.06
C-band correction	0.1	0.1

3. 電子銃^[1]

本電子銃では、空間電荷効果によるビームの発散を抑制するため、加速電圧を500kVと高く設定している。電子銃の構造はSCSS試験加速器とほとんど同じであり、電子銃本体は、図4のようにパルススタンクに直接取り付けられる油浸式である。ビーム性能は以下の表の通り。

表 3: 電子銃パラメータ

Beam energy	500 keV
Peak current	1 - 3 A
Pulse width	1.6 μ s
Repetition rate	60 pps
Normalized emittance	0.4 π mm mrad

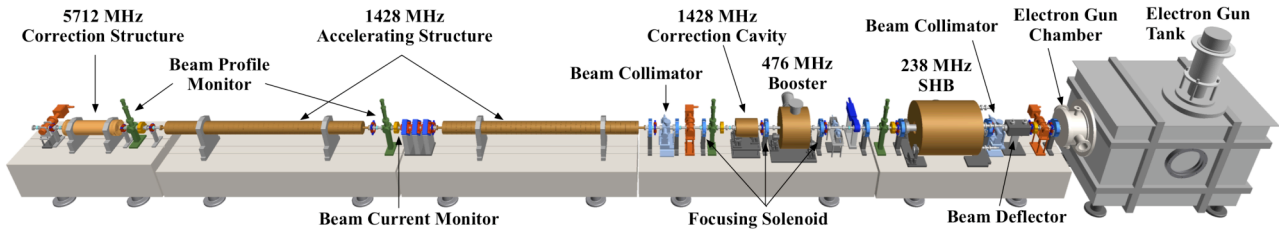


図4: 入射部機器の構成図 (電子銃、加速部のみ)

3.1 カソード

直径3mmのCeB₆単結晶カソードを採用した。この場合、理論的熱エミッタンスはカソード温度1400°Cにおいて約0.4 π mm mradである。この温度では、1Aのカソード電流を、実用上十分に長い期間維持可能である。また、ヒータには、機械的および化学的安定性に優れたグラファイトを採用した。

3.2 ビームデフレクタ^[10]

通常のカソードが持つグリッドは、カソード表面付近の電界がエミッタンスを悪化させる。そのため本電子銃はグリッドの代わりにすぐ下流のビームデフレクタによって、長いビームパルスから1nsパルスを切り出した。

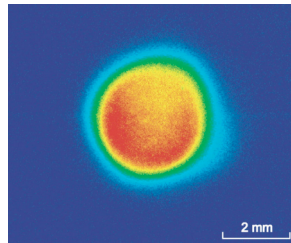


図5:デフレクタ直後でのビームプロファイル

デフレクタは二枚の平行平板電極と常時励磁されている偏向電磁石とで構成され、幅約1nsの高電圧ゲートパルスが作る電界と磁界が打ち消している間のみ、電子ビームはデフレクタを通過する。図5はSCSSにてデフレクタ下流のスクリーンモニターで観測されたビームプロファイルである。円形プロファイルの周辺部が明瞭であり、プロファイル内の電子密度がほぼ均一であることが分かる。

4. 多段バンチングシステム

4.1 SHB およびブースタ

238MHz SHB空洞は、通過する電子ビームにエネルギー変調を与え、ビームは下流のビーム輸送系を通過する間に、速度バンチングにより約1/5に圧縮される。SHB空洞を励振するのは3.5kW半導体アンプ4台である。

続く476MHzブースタ空洞はビームを1.1MeVまで加速し、空間電荷効果を抑制する。120kW出力のIOT (Eimac CHK2800W)がRF源である。

4.2 Lバンド加速管

図4に示すように、二本のLバンド加速管が1MeVビームを35MeVまで加速する。加速構造はASP型 (Alternative Periodic Structure)を採用し、各加速管は18個の加速セルと中央のカップラセルで構成される。導波管は、SF₆などの絶縁ガスを使用しない真空型を採用する。そのためサーキュレータを使用できな

いので、二本のAPS管からの反射波が分配器で打ち消すように導波管長を決定する必要がある。

APS管の場合、進行波管と違って、加速電界の非対称性を生じやすいカップラを加速管の中央に配置できるため、APS管に入射した直後のエネルギーの低いビームには、電界非対称性を原因とするエミッタンス増加が起こらない。そして加速管の中央に達したビームはすでに十分加速されているため、カップラの非対称性には影響されにくい。

4.3 補正空洞

Lバンド補正空洞は、二連単空洞であり、シャントインピーダンスを高めるためにリエントラント型の形状をしている。図1のように半導体増幅器四台で二台の空洞を駆動する予定である。

Cバンド補正加速管は、主加速部のチョークモード型Cバンド進行波管を必要な加速電圧が得られる程度まで短縮した設計としている(26セル 3 π /4モード)。ただし、製作を容易にするため定インピーダンス型である。RF源には主加速部と同じく50MWクライストロンを使用する。

参考文献

- [1] K. Togawa et al., "CeB₆ electron gun for low-emittance injector", PR STAB, 10, 020703 (2007).
- [2] H. Tanaka et al., "Low Emittance Injector at SCSS", Proc. of FEL 2006, Berlin, pp. 769-776 (2006).
- [3] H. Tanaka et al., "SCSS 試験加速器の運転状況 - 50~60 nm のレーザー波長領域での連続 SASE 飽和の達成-", 本論文集.
- [4] T. Hara et al., "XFEL/SPring-8 ビームパラメータの基本設計", 第4回加速器学会年会, 和光, 2007, pp. 610.
- [5] K. Togawa et al., "XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮器におけるエネルギーチャープの線形化", 第4回加速器学会年会, 和光, 2007, pp. 616.
- [6] H. Tanaka et al., "XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価", 第4回加速器学会年会, 和光, 2007, pp. 613.
- [7] A. Kawasaki et al., "X-FEL/SPring-8 向け高電圧充電器の開発", 本論文集.
- [8] H. Maesaka et al., "SCSS 試験加速器の RF システムの高精度化", 本論文集.
- [9] N. Hosoda et al., "SCSS 試験加速器における EUV レーザー安定化のための高電圧パルスディフレクタのタイミング制御", 本論文集.
- [10] K. Togawa et al., "低エミッタンス・短バンチ電子ビーム生成のためのビームディフレクタの開発", 第3回加速器学会年会, 仙台, 2006, pp. 551.