

DEVELOPMENT OF BEAM DIAGNOSIS SYSTEM WITH A SPATIAL RESOLUTION OF SEVERAL MICRON-METERS FOR XFEL/SPRING-8

Yuji Otake^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shinobu Inoue^{A)}, Kenich Yanagida^{B)}, Atushi Higasiya^{A)},
Hiroyasu Ego^{B)}, Makina Yabasi^{A)}, Hiromitsu Tomizwawa^{B)}, and Tsumoru Shintake^{A)}

A) RIKEN, XFEL Joint Project /SPRING-8

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

B) JASRI, XFEL Joint Project /SPRING-8

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

Abstract

A stability of several micron-meters of an electron beam is demanded for the XFEL/SPRING-8 undulator section to stably generate an X-ray laser. Due to such beam stability, spatial and temporal structure measurements of beams are very important. We have developed an electron beam diagnosis system with a measurement resolution of several micron-meters. The system is composed of a cavity-type beam-position monitor, an optical transition radiation screen monitor, a beam-current monitor, an rf beam deflector to observe femto-second order temporal structure, and beam slits to appropriately shape the beam spatial structure. The instrument arrangement along the accelerator was decided by requirements of the beam position and size measurements based on the electron-beam optics design. This paper presents the development status of the beam-diagnosis system. The test results of the instruments showed sufficient performance to achieve the measurement resolution as mentioned above.

XFELのためのビーム診断システム開発の現状報告 (数 μm 以下の空間分解能を目指して)

1. はじめに

X線自由電子レーザーのようなSASE (self amplified spontaneous emission) 法を使用した装置では、アンジュレータと線型加速器が使用される。SASE法の場合は干渉性X線を放射するので、たとえば有効長90m近いアンジュレータ区間を電子ビームとそれから発生するSASE光が $4\mu\text{m}$ 以内でオーバーラップしないといけない^[1]。そうでなければ、光の電磁場での電子ビームの密度変調によるマイクロバンチの生成がうまくいかず、強いピーク電流が維持されないと非線形増幅が働かない。この

電子ビームは、数十 μm 程度のサイズでピーク電流もkAクラス、マイクロバンチの幅がX線の波長領域に達するので、そのエミッタンスと強度のふらつきが安定なSASEを維持できるレベルである必要がある^[2]。現在、理化学研究所では波長 1 \AA のX線自由電子レーザー装置^[3]の建設を進めている。この装置は、高輝度熱電子銃と速度変調空洞によるバンチ圧縮、加速管による電子ビームの縦方向エネルギーチャープと磁気シケインによるバンチ圧縮、後段のCバンド加速器での高電界加速 (37MeV/m) で表1のような電子ビームを作り出す。

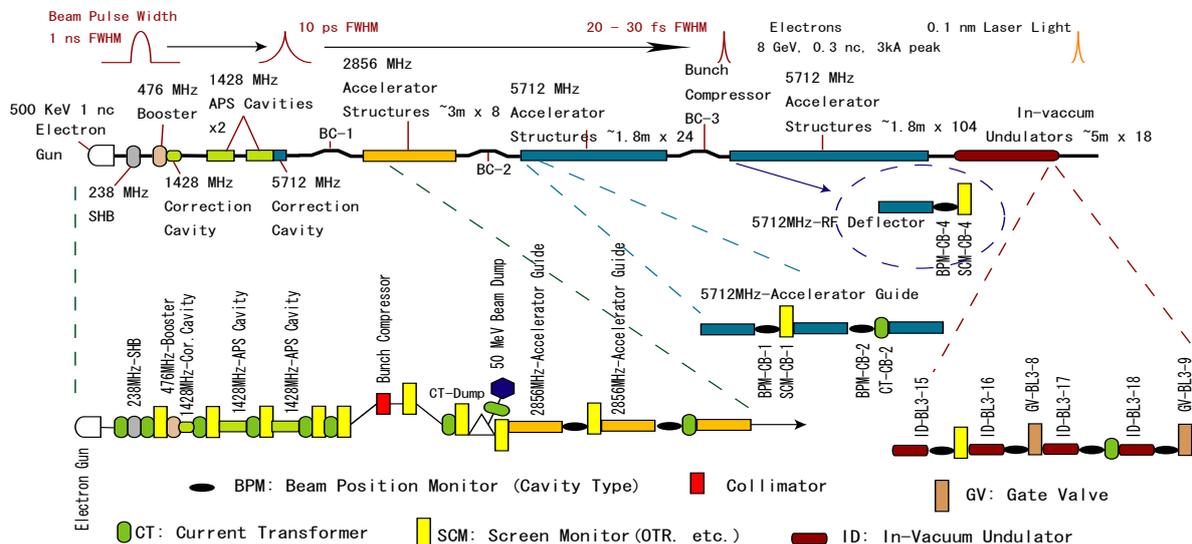


図1 : XFEL/SPRING-8において計画しているビームモニターの配置例

表 1 : SASE 光発生のための電子ビーム^[2]

エネルギー	~8 GeV
電荷総量	~0.3 nC (ピーク電流 1 kA)
エミタンス	~1 π mmrad
大きさ	~50 μ m (rms)
パルス幅	~40 fs (rms)

表 2 : XFEL/SPring-8のビームモニターの種類と数

ビーム位置モニター BPM	総計 61
スクリーンモニター SCM	総計 32 デマルケスト (入射部) 3 OTR (他) 29
電流モニター CT	総計 29 1 単極出力 28 差動出力
波長計	3-6

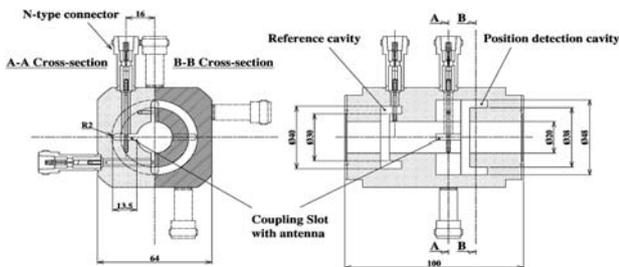


図2 : 空洞型ビーム位置モニター

以上のXFEL装置のビーム調整を行うには、ビームモニターにもビームの質と同等の位置・時間の分解能が求められ、おのおの数 μ mで数十fs^[4]である。

2. ビームモニターシステム

図 1 には、XFEL/SPring-8で計画されている数 μ mで数十fs以下の位置・時間の分解能を達成するための、ビームモニターの加速器・光源に沿った配置を示す。また表2には主なるモニターの数と種類を示す。主なるモニターは、ビームの位置と形状を測定する空洞型ビーム位置モニター (BPM) とスクリーンモニター (SCM)、強度を測定する差動型の電流モニター (CT) である^[5]。このCTは、同相ノイズを低減するために100 Ω で数GHz以上の伝送帯域を持つ差動伝送路を採用した。また、ビーム位置モニターは位置測定空洞に加えて強度測定空洞を持つが、この空洞はビームの到達時間の変化を測定するためにも使用する。ビームのバンチ長を測定するためには、4つの遮断周波数の異なる導波管を直列接続して、各々を50GHz以上の応答を持つ検波器で測定する波長計がある^[6]。この装置はビームの航跡場を検出し、概略なバンチ長を測定する。精密なビームの縦方向構造を知るためには、5712 MHzのHEM110空洞^[7]と高精度SCMで構成されたビームデフレクター装置がある。この空洞は、他の加速部との高周波源の互換から5712MHzの周波数を選んでおり、空洞の製造の容易さからレーストラック型のビームホール持つことを特徴としている。

以上のビームモニターを配置した建設中のXFEL

加速器では、電子銃から速度変調用空洞、それに続くバンチ圧縮部、加速管によるビームのバンチ内エネルギーチャープ印加部と磁気シケインによるバンチ圧縮部、デフレクター部、光源であるアンジュレータライン部が、発生するX線レーザーの特性や安定度を決定する。であるので、この部分に設置されるビームモニターの測定精度は特に重要である。この報告では、紙面の関係上、FELにとって重要なビームの位置とサイズの測定精度を決定するBPMとSCMについて詳細を述べる

3. ビームモニター機器

3.1 空洞型ビーム位置モニター

空洞型位置ビームモニター (BPM) は図2の構造を持ち^[8]、TM110モードの位置検出空洞と強度測定用のTM010モードの空洞を持つ。位置検出空洞は、X軸とY軸の信号を区別するための空洞に接続されたスロットを持つ。5712MHzの加速管からの暗電流の影響を除くためにこのモニターの空洞は、4760MHzの共振周波数となっている。目標の検出精度は既に述べたように数 μ m以下である。現状のBPMの到達測定精度を示すデータは、SCSS試験加速器を使用して取得した。直線状に並んだ3つのBPMを使い、前後の2つで予想軌道を決め、真ん中のBPMで実際の軌道による位置を測定した。予想と測定軌道と比較して測定精度を推定した。達せられた精度は、X軸、Y軸とも5 μ m以下と推定できた^[9]。この測定精度では目標とする位置分解能には不十分である。そのために現在、図3のIQ法を使用した検出回路を開発して、目標を十分超えるSub- μ mの分解能を得ようとしている。本回路の試験加速のビームを使用した暫定的な測定精度の評価では、現状のシステムのノイズから考えて、Sub- μ mの測定分解能が得られそうなデータが出ている (図4)。

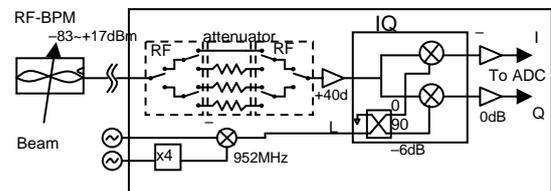


図 3 : 測定精度向上のための新規BPM検出回路

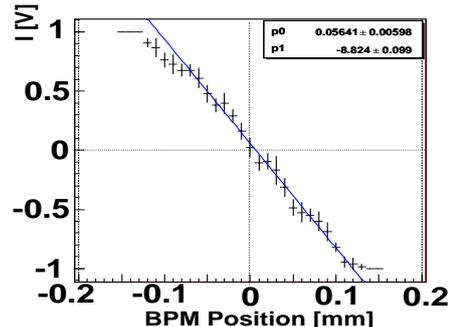


図 4 : BPMのビームの位置に依存した電圧出力

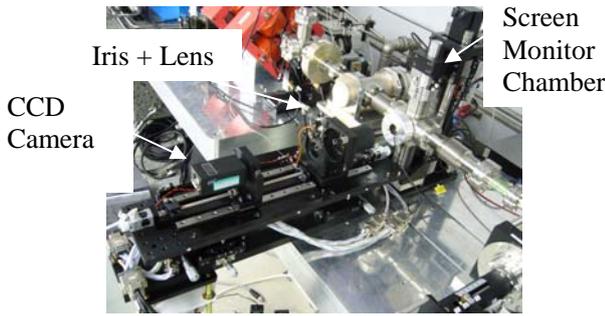


図4：開発したOTRスクリーンモニター

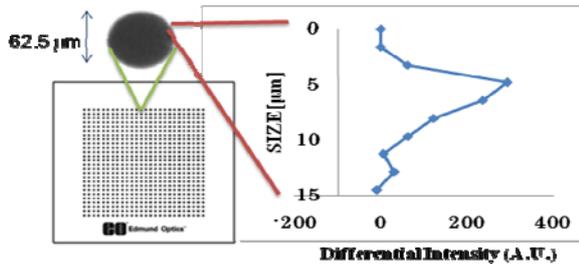


図5：SCMの画像測定分解能．開発したSCMで62.5 μm 直径のドットを見た例．ドットのエッジのコントラストを微分して変化を得たグラフである．グラフから画像の分解能は、約4 μm (FWHM) 以下で

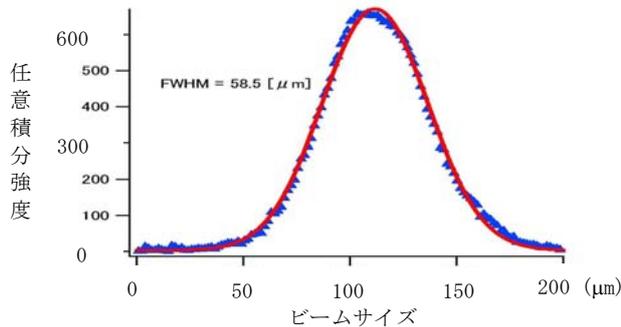


図6：開発したモニターのスクリーン上で、Q電磁石により電子を横方向に最大限絞り観測したデータ．FWHMで約60 μm である．

3.2 スクリーンモニター

図4には、20 μm 以下の位置決定精度を目指して開発した、電子ビームのプロファイル観測用のスクリーンモニター (SCM) を示す．これはOTR (optical transition light) モニターである．特徴は、アンジュレータ近傍に設置する場合もあるので、スクリーン物質によるガンマー線シャワーなどでアンジュレータの永久磁石が減磁されることを少なくする意味で、SUSの100 μm 厚の薄いターゲットを使用していることである．このターゲットは、アロン社で開発された拡散接合の技術で製作されている．ビームの通過するターゲット部分は薄く、それ以外の外周の額縁部分は真空容器などに取り付けるために強度を増す必要があり厚く (1mm以上) してある．また、要求の測定精度を達成するために真空容器横の光学ベンチなどの機械系は、アライメントをやりやすく製作コスト下げるために、分割した市販品の

ステージを多用した．光学系は今回独自に設計して、低分散ガラスの3群4枚のレンズを使用した．このモニターの測定分解能を評価するためには、光学用の62.5 μm の丸い斑点が並んだフィルムを観測した．その結果から、斑点の淵の像を微分したコントラストの変化から、図5に示す4 μm (FWHM) 以下の測定分解能が実現したと言える．このモニターのビームによる評価試験を試験加速器で行った．発光を確認し、スクリーン上にQ磁石によりビームを最大限絞ることで、どれくらいまでの大きさの像が実際のビームで測定できるかを試した．その結果、図6に示すようにFWHMで約58.5 μm までの像が測定でき、それ以下も可能であろう．

4. まとめ

要求される数 μm 位置分解を持つモニターをXFELのビーム調整のために開発してきた．紙面の関係上、全てのモニターについては述べられなかったが、BPMやSCMを代表して述べた．開発した全てのモニターは、ほぼ要求性を満足できるものができつつある．今後はこれを継続して、2010年のXFELの発振実験に間に合うようにモニター系の開発と建設を進めていく．この開発研究を進めるにあたって、XFEL計画推進本部の皆様が多量の協力をいただいた．ここに感謝の意を表す．

参考文献

- [1] T. Tanaka *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **528**, 172 (2004).
- [2] H. Tanaka, private communications (Internal Report for XFEL/SPring8, 2007 in Japanese).
- [3] T. Tanaka and T. Shintake, (Eds.) SCSS X-FEL Conceptual Design Report (RIKEN Harima Institute, Japan, 2005).
- [4] Y. Otake *et al.*, Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-second Stability, Proc. of ICALEPCS07 (2007).
- [5] A. Higashiya *et al.*, Development of a Beam Current Transformer for the X-FEL Project in SPring-8, Proc. of the 29th International Free Electron Laser Conference (2007).
- [6] H. Maesaka *et al.*, Development of the Microwave Spectrometer for the Bunch Length Measurement using Coherent Transition Radiation at the SCSS Prototype Accelerator, Proc. of the 3rd Particle Accelerator Society of Japan (2006), in Japanese.
- [7] H. Ego *et al.*, Design of the Transverse C-band RF Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL, Proc. of the 11th European Particle Accelerator Conference, EPAC08 (2008).
- [8] T. Shintake, Development of Nanometer Resolution RF-BPMs, Proc. of High Energy Accelerator Conference (HEAC 1999).
- [9] H. Maesaka *et al.*, Beam Position Monitor at the SCSS Prototype Accelerator, Proc. of 4th Asian Particle Accelerator Conference (APAC 2007).