

DEVELOPMENT STATUS OF THE BEAM DIAGNOSTIC SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8

Hirokazu Maesaka^{1,A)}, Shinobu Inoue^{A)}, Shin'ichi Matsubara^{A)}, Ken'ichi Yanagida^{B)}, Hiroyasu Ego^{B)}, Atsushi Higashiya^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Makina Yabashi^{A)}, Hiromitsu Tomizawa^{B)}, Tsumoru Shintake^{A)} and Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN, XFEL Joint Project / SPring-8

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

^{B)} JASRI, XFEL Joint Project / SPring-8

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

Abstract

The XFEL facility requires sub- μm resolution beam position monitors (BPM), screen monitors with a resolution of less than 10 μm , high-speed beam-charge monitors and a temporal structure measurement system with a resolution of less than 10 fs. We developed an rf cavity BPM that uses the TM110 mode at 4760 MHz. The estimated position resolution was 0.2 μm . For the screen monitor, we designed a custom lens system having a 2 μm resolution and variable magnifications from 1 to 4. For the charge measurement, we developed a high-speed differential current transformer (CT). The rise time of the CT signal was 0.2 ns and common-mode noise was considerably reduced. To measure the temporal beam structure, we developed a C-band (5712 MHz) transverse deflecting cavity that has a disk-loaded backward traveling wave structure. This cavity can resolve a beam into a few fs fragments. Thus, the beam-diagnostic system satisfies the demands of the XFEL accelerator.

X線自由電子レーザー計画におけるビーム診断システムの開発状況

1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)計画^[1]では, SASE (Self-amplified Spontaneous Emission) 方式により高輝度のX線レーザーを発生させる。これには, 低エミッタンス($0.7 \pi \text{ mm mrad}$)かつ高いピーク電流(3kA)の電子ビームを生成し, それを長いアンジュレータ区間で電子ビームと放射X線とを重なり合わせて相互作用させる必要がある。この条件を満たすべく, 図1に示すような装置レイアウトをデザインした。熱電子銃から出たビームは, 速度変調バンチングと3つのシケイン型バンチ圧縮器をへて, バンチ長が30 fs (FWHM)になるまで圧縮され, ピーク電流が3kAとなる。そのビームは8 GeVまで加速され, アンジュレータでX線レーザーを発生する。

本装置は多段の複雑なシステムとなっているため, バンチ圧縮・加速からX線発生に至るまでのすべて

の段階でビームの位置・形状・電荷量やバンチ長・スライスエミッタンスといった時間構造を高精度に測定しなければならない。ビーム位置については, アンジュレータ区間においてX線と電子ビームが4 μm 以下で重なり合っていないと測定できないので, そのおおよそ桁下の0.5 μm 以下の分解能が必要である^[2]。形状については, ビーム半径が数10 μm となるうえ, Qスキャン法によるエミッタンス測定では10 μm 以下になるので, 10 μm 以下の分解能が必要となる。時間構造については, ピーク電流やスライスエミッタンスがFEL出力に直接効くので特に重要であり, 10 fs以下の分解能が必要とされる。

本稿では, これらの要求を満たすためのビーム診断システムの開発状況についてまとめる。前回の発表^[3]以降, 量産初号機が納入されSCSS試験加速器^[4]にて性能測定をおこなったのでそのことについて詳しく述べる。

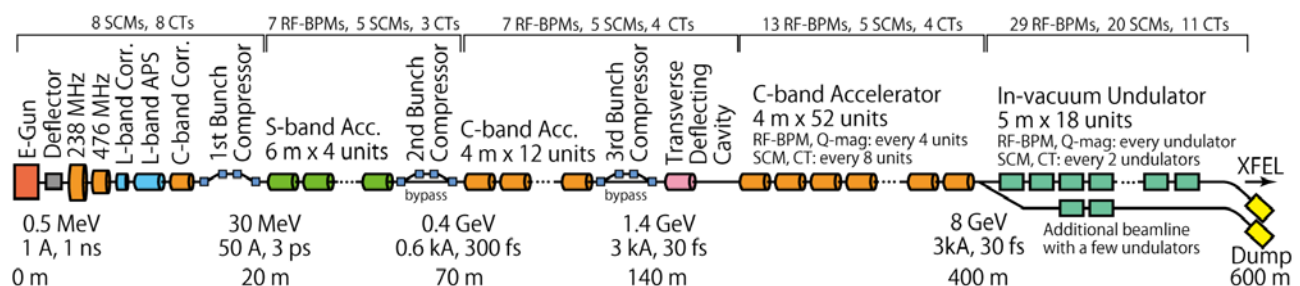


図 1: XFEL 施設のレイアウトとビーム診断機器の配置。

¹ E-mail: maesaka@spring8.or.jp

2. ビーム診断システムの概略と状況

XFELでは、位置測定にRF空洞型ビーム位置検出器(RF-BPM)^[5]、形状測定に遷移放射光(OTR)や蛍光板を用いたスクリーンモニタ(SCM)^[6]、ビーム電荷測定に差動型Current Transformer (CT)^[7]、パンチ長・スライスエミッタンス測定にCバンドRFディフレクタ空洞(RF-DEF)^[8]を使用する。図1のレイアウトにはこれらのビーム診断機器の配置も記してある。また、診断機器の総数を表1に示す。

これらの機器本体、および、周辺回路の設計は、前回の発表^[3]までにほとんど終わっており、現在、製作が進んでいる。RF-BPM, SCM, CT については、量産初号機の性能測定をSCSS試験加速器にておこなった。そして、機器の据え付けも始まっている。RF-DEFについては、空洞の7セルモデルを製作して性能を確かめた。現在は実機の空洞の製作がおこなわれている。このように、各機器の開発・製作は予定通り順調に進められている。

表 1: ビーム診断機器の総数

RF 空洞型ビーム位置モニタ	56
スクリーンモニタ	43
差動型 CT	30
RF ディフレクタ	1

3. 各機器の設計と性能

3.1 RF空洞型ビーム位置モニタ (RF-BPM)^[5]

RF-BPM空洞の概略図を図2に示す。RF-BPMはビームが円筒空洞に誘起するTM110モードを利用して位置を検出する。このモードでは、振幅がビーム位置と電荷に比例し、位相は位置の符号が変わると180度変わる。ビーム位置を求めるには、振幅を電荷量で規格化し、位相の原点を知らなければならないので、TM010空洞を併設して電荷と位相原点を決定する。共振周波数はTM110, TM010の両方とも4760MHzである。得られたRF信号はIQ (In-phase and Quadrature) 復調器で同期検波され、A/D変換器(ADC)に記録される。

量産初号機の完成後、その性能をSCSS試験加速器にて測定した^[5]。ここでは、RF-BPMの分解能に的を絞って述べる。RF-BPMの分解能は図4上側に示すように直線上に並んだ3つのBPMを用いて測定した。図中、BPM 2が量産初号機で、BPM 1と3は既設のRF-BPMである。BPM 1と3の測定データからBPM 2でのビーム位置を内挿して求め、それとBPM 2の測定データとの差から分解能を算出した。この差のヒストグラムを図4下側に示す。このデータから、RF-BPMの位置分解能は水平方向が0.20 μm 、鉛直方向が0.17 μm と求めた。これは、XFELの要求(0.5 μm 以下)を満たしている。

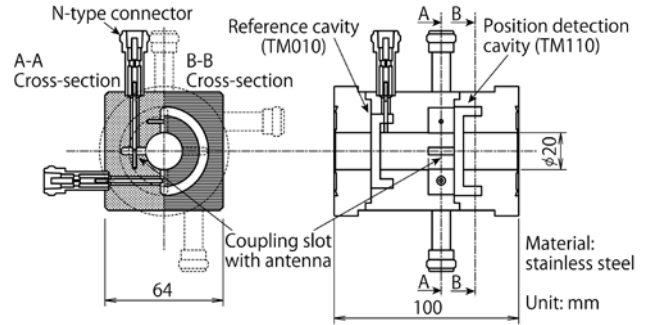


図 2: RF-BPM 空洞の概略図

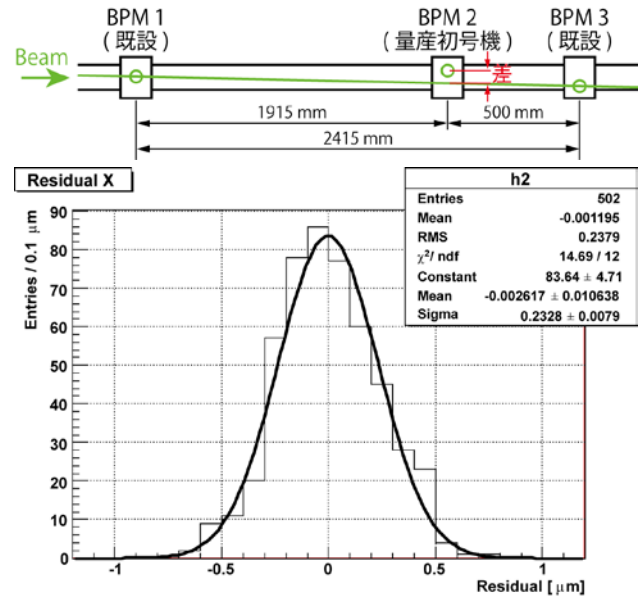


図 4: 上側の図は3つのRF-BPMを使って位置分解能測定をしたときの測定セットアップで、下側の図はBPM 2での測定データとBPM 1と3からの内挿位置との差のヒストグラムである。太い実線はガウシアンフィット結果である。

3.2 スクリーンモニタ (SCM)^[6]

SCMでは10 μm 以下の分解能を得るため、カスタムメイドのレンズとモータ駆動の可変ズーム機構(1~4倍)を開発した。その写真を図5に示す。4倍光学系での分解能をグリッドディストーション図表で測定した結果、2 μm の分解能があることが分かっている^[6]。

スクリーンとしては、OTRには0.1mm厚のステンレスフォイル、蛍光板にはCe:YAGを使用する。100MeV以上のビームにはOTR、100MeV以下ではCe:YAGを使う。100MeV近辺では両方のスクリーンを使えるように3段階切替のニューマチックアクチュエータを採用した。

量産初号機を使ってSCSS試験加速器のビームプロファイルを測定した結果を図6に示す。標準偏差で10 μm あまりの幅のビームが適切に測定できている。Ce:YAGで若干幅が大きいのはCe:YAG内での電子の多重散乱などが原因であると考えられる。試験

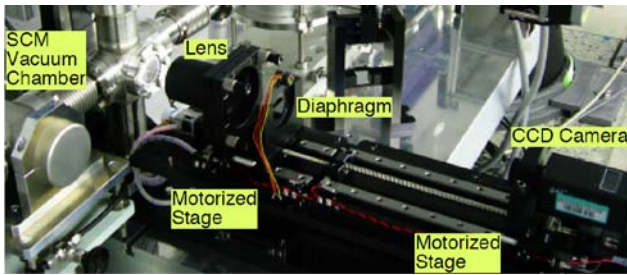


図 5: SCM の写真

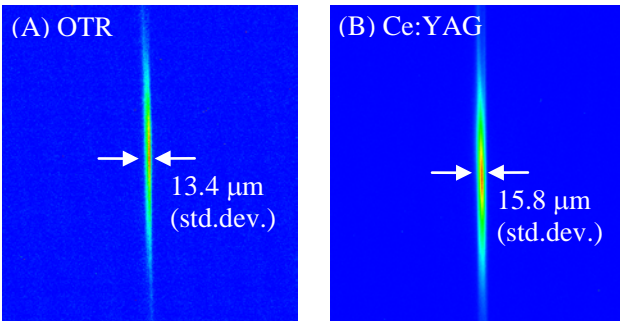


図 6: (A) OTR で測定したビームプロファイル。
(B) Ce:YAG で測定したビームプロファイル。いずれもレンズの倍率は4倍で、ビームは四極電磁石で水平方向に収束してある。

加速器ではビームを $10\mu\text{m}$ 以下に絞ることができないのでXFELでの必要性能を確認することはできないが、グリッドディストーション図表の測定などからXFELでも十分に使用可能であると考えられる。

3.3 差動型CT^[7]

ビーム電荷測定に用いる差動型CTの概略図を図7に示す。高周波用コアにコイルが4か所巻いてある。このうち2つは他の2つとは逆向きに巻いており、それぞれ逆の極性をもった信号が得られる。正の信号と負の信号の差をとることにより、外からのコモンモードノイズを低減させることができる。そして、コイルは1巻きとして速い応答ができるようにした。また、ポート数を2ではなく倍の4にしたのは、信号のビーム位置依存性をなくすためである。

SCSS試験加速器にて量産初号機の信号をオシロスコープで測定した結果を図8に示す。10-90%立ち上がりが約 0.2ns の速い信号が得られた。また、図では示されていないが、外来ノイズも低減できることが確かめられた。

3.4 CバンドRFディフレクタ空胴 (RF-DEF)^[8]

ビームのパンチ長やスライスエミッタンスといった時間構造を測定するために、RAIDEN^[8]と呼ばれるCバンドRFディフレクタ空胴を開発している。この空胴の概略図を図9に示す。本空胴はHEM11というビームを横方向にキックするモードを用い、ビームの時間構造を横方向に引き延ばしてSCMで撮像することによってビームの時間構造を得る。周波数は 5712MHz で、 $5\pi/6$ モードの定インピーダンス後進波

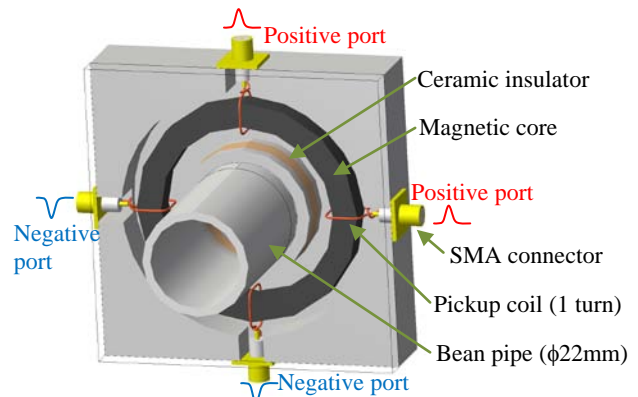


図 7: 差動型 CT の概略図

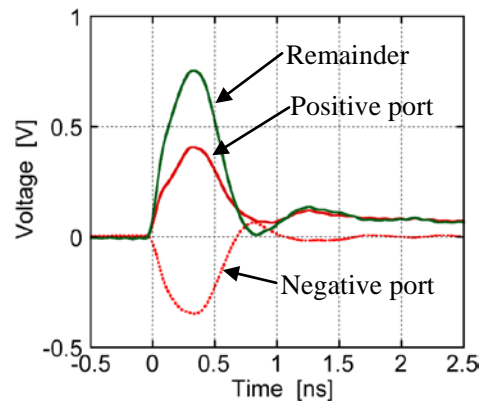


図 8: 差動型 CT の波形

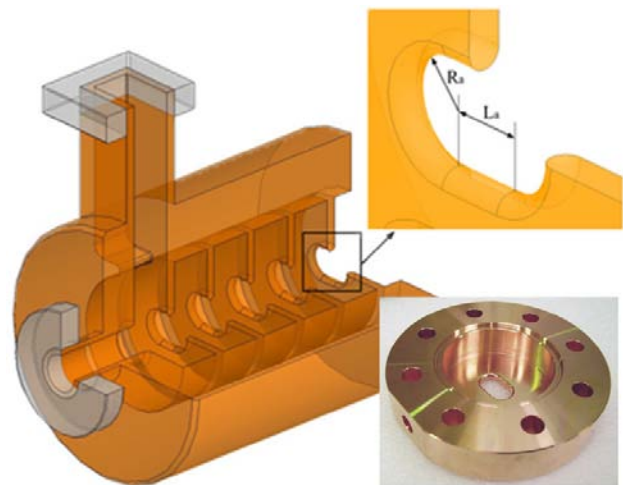


図 9: RAIDEN 空胴の概略図。右下の写真は製造したセル単体である。

管である。円筒対称な空胴では水平と垂直のモードが縮退するので、ビーム孔をレストラック型にして縮退を解いている。このRAIDEN空胴1本の長さは 1.7m で、 50MW のクライストロンから2本の空胴にRFを供給する。これを3番目のパンチ圧縮器の直後に設置し、空胴の5m下流で 1.4 GeV のビームを数fs分解能で時間構造を測定する。本システムは1か所だけに設置するが、1番目、2番目のパンチ圧縮器直後の時間構造は、2番目、3番目のパンチ圧縮器のバイパスラインを使用すれば測定可能である。

RAIDEN空洞の基本性能を確かめるため、7セルモデルを製作した。この目的は、パスバンドやシャントインピーダンスなどのRF性能の確認と、セルの製造工程などの試験をおこなうことである。まず、シャントインピーダンスをビーズ法で測定し、シミュレーションの約98%という良好な値が得られた。パスバンドについてもシミュレーション通りの結果が得られ、垂直と水平のモードが適切に分離できていることを確認した。製造工程については、一般の加速管にはないレーストラックの部分があるので、その試験を重点的におこなった。レーストラック部はフライス加工のあとに電解研磨をおこなってRMSで1 μ mの面粗度を得ることができた。このように、RF性能から製造技術にいたるまで一連の性能確認をおこなうことができた。現在、1.7mの空洞を製作中である。

4. まとめ

XFELで必要とされる、分解能0.5 μ m以下のRF-BPM、分解能10 μ m以下のSCM、ノイズに強く高速の差動CT、分解能10fsで時間構造を測定可能なRF-DEFを開発した。SCSS試験加速器での測定の結果、RF-BPM、SCM、CTのいずれについてもXFELにおいて十分に使用可能な性能が得られた。また、RF-DEFについては7セルモデルによる基本性能測定の結果、シミュレーション通りの性能が得られた。現在、各ビーム診断機器の製作が順調に進んでいる。

参考文献

- [1] T. Shintake *et al.*, "Status of XFEL/SPring-8 Construction", in these proceedings.
- [2] SCSS X-FEL R&D Group, "SCSS X-FEL Conceptual Design Report", (2004).
- [3] Y. Otake *et al.*, "Development of Beam Diagnosis System with a Spatial Resolution of Several Micron-meters for XFEL/SPring-8", Proc. of the 6th Meeting of the Particle Accel. Soc. of Japan (2008).
- [4] T. Shintake *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 070701 (2009).
- [5] H. Maesaka *et al.*, "Development of the RF Cavity BPM of XFEL/SPring-8", Proc. of DIPAC'09 (2009).
- [6] K. Yanagida *et al.*, "Spacial Resolution of Screen Monitor for XFEL/SPring-8", in these proceedings;
K. Yanagida, et al., "Optics of Screen Monitor for XFEL/SPring-8", Proc. of the 5th Meeting of the Particle Accel. Soc. of Japan (2008);
S. Inoue, et al., "Screen Monitor Prototype for XFEL/SPring-8", Proc. of the 5th Meeting of the Particle Accel. Soc. of Japan (2008).
- [7] A. Higashiya *et al.*, "Development of a Beam Current Transformer for the X-FEL Project in SPring-8", Proc. of FEL'07 (2007).
- [8] H. Ego *et al.*, "Design of the Transverse C-band Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL", Proc. of EPAC'08 (2008).