

## PERFORMANCE OF THE BEAM POSITION MONITOR AND THE CHARGE MONITOR AT THE SCSS PROTOTYPE ACCELERATOR

Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Tsumoru Shintake<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Kazuaki Togawa<sup>A)</sup>, Atsushi Higashiya<sup>A)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>B)</sup>, Takashi Ohshima<sup>B)</sup>, Toru Fukui<sup>B)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>, and the other SCSS prototype accelerator members

<sup>A)</sup> RIKEN/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

<sup>B)</sup> JASRI/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

### Abstract

The X-ray FEL project, SCSS, is in progress at RIKEN/SPring-8, and the SCSS prototype accelerator is in operation to generate VUV FEL. In these accelerators, RF-BPMs (Radio Frequency Beam Position Monitor) are used for beam position measurements, and CTs (Current Transformer) are utilized as beam charge monitors. The requirement of the beam position resolution is 10 $\mu$ m for the prototype accelerator and less than 1 $\mu$ m for X-ray FEL. We evaluated the position resolution of RF-BPMs after the appropriate calibration of them. The resolution was less than 5 $\mu$ m, which satisfies the requirement of the prototype accelerator. We also measured the CT response, and confirmed that the response linearity is enough for the beam tuning. The prototype accelerator was appropriately tuned by using RF-BPMs and CTs, and the VUV FEL amplification was observed. This fact verified the sufficient performance of these monitors.

### SCSS試験加速器のビーム位置検出器および電荷検出器の性能

#### 1. はじめに

理化学研究所・播磨研究所と高輝度光科学研究センターでは、X線自由電子レーザーSCSS計画<sup>[1-4]</sup>が進められており、その原理実証を行うために、SCSS試験加速器<sup>[2-4]</sup>が運転されている。本計画では、ビーム位置検出器としてRF-BPM、ビーム電荷検出器としてCTが採用され、試験加速器で実際に使用されている。本稿では、試験加速器で電子ビームを用いて測定された、RF-BPMの較正・性能データ、および、CTの性能について報告する。

#### 2. ビーム位置検出器：RF-BPM

SCSSにおけるビーム位置検出器に要求される位置分解能は、試験加速器(VUV FEL)に対して10 $\mu$ m、X線FELに対して1 $\mu$ m以下である。これらの要求を満たすものとして、本計画ではRF-BPMが採用された。このBPMの位置精度は過去の実験で1nCの電荷のビームに対して数10nmが得られている<sup>[5,6]</sup>。ここでは、SCSSで用いているRF-BPMを紹介し、その較正データと位置精度のデータについて述べる。

##### 2.1 RF-BPMの測定原理

電子ビームがRF共振空洞を通過すると、ウェーク場により空洞に共振したRFが励起される。とくに、TM110モードのRFの振幅は空洞中心軸近傍で、

$$V_{RF} = A_1 qy + jA_2 qy' + jA_3 q + V_N \quad (1)$$

と表すことができる<sup>[5]</sup>。ここに、 $A_1$ はビーム位置の比例係数、 $A_2$ はビームの傾きの比例係数、 $A_3$ はTM010モードの混入の割合、 $V_N$ はそれら以外のノイズである。位置の検出に使えるのは第1項だけであるが、第2、3項は第1項と位相が90度異なるため、

原理的には第2、3項を取り除くことが可能である。なお、第1項は電荷にも比例しているが、別のTM010空洞を設けるなどして電荷の情報を得るようになればよい。

##### 2.2 RF-BPMのハードウェア構成

SCSSで用いるRF-BPMは位置を検出するためのTM110モードの空洞(位置検出空洞)と電荷量を測るためのTM010モードの空洞(基準空洞)が組になっている。共振周波数は、いずれの空洞も検出に使うモードに対して4760MHzである。加速管からの暗電流の影響を避けるため加速周波数5712MHzからずらしている。RF空洞の詳細は文献[1]を参照されたい。

図1にわれわれのRF-BPMの写真を示す。RF-BPMの空洞はXYステージに乗っており、アライメントの微調整ができるようになっている。複数の

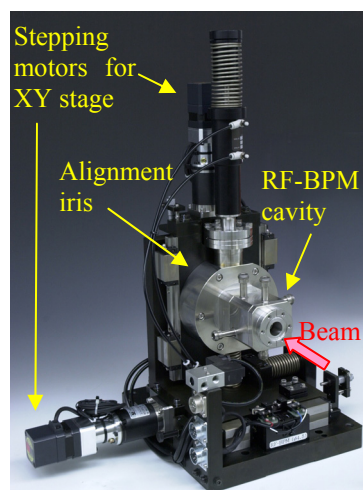


図1：RF-BPMの写真

BPMを一直線上に並べられるよう、レーザーを使ったアライメントのためのアイリスがついている。

RF-BPMから出た信号は加速器に同期されたRFで検波され、位置検出用の振幅と符号判断用の位相の情報が取り出される。振幅に関しては、対数アンプを使用することによってダイナミックレンジを広げるとともに中心軸付近での感度を上げている。位相は-90~+90度が電圧に変換されて出てくる。振幅・位相とも約70dBのダイナミックレンジがあることが確かめられている。これらの信号は波形記憶ADCで読み出され、上位計算機に送られる<sup>[7]</sup>。

### 2.3 RF-BPMの較正

RF-BPMのスケールをあわすため、電子ビームを用いてRF-BPMの較正を行った。RF-BPMはXYステージで動かせるので、ビーム軌道を固定してRF-BPMを動かしてデータを取ることを考えた。較正データの収集手順は以下の通りである。

- (1) XYステージを原点にあわせる。
- (2) ビーム軌道がRF-BPMの中心に合うよう、軌道修正電磁石を調整して振幅が最小となるようにする。
- (3) XYステージを0.1mmずつ動かして、各点で100ショットのデータを取る。

得られたデータを図2に示す。振幅のプロットでは基準空洞で得られた電荷量の補正がすでになされている。そしてそのプロットは対数関数でうまくフィットできている。位相に関しては、原点で180度反転しており、位置の符号が適切に得られていることを示している。

### 2.4 RF-BPMの位置精度

RF-BPMの性能を確かめるため、電子ビームを用いて位置精度を測定した。位置精度の測定には直線上に並んだ3つのRF-BPMを用いる。3つのうち上下流の測定値でビーム軌道を決定し、真ん中のBPMでの位置を内挿する。内挿された位置と、真ん中のBPMの測定値との差からRF-BPMの精度を求めることができる。

測定に用いたRF-BPMは計4つで、上流からA, B, C, Dと名づけることにする。ABCの組み合わせでBの精度を、BCDの組み合わせでCの精度を測った。隣り合うBPM間の距離は2.5~6m程度離れており、さまざまな機器が間に入っているが、AとDの間の電磁石は極力切ってビーム軌道を曲げないようにした。データ収集時のビームエネルギーは250MeV、電荷量は約0.2nC、ビーム半径は $\sigma$ で約0.3mmであった。データは計2000ショットを取った。

Bの測定値とA,Cから求めた位置との差の分布を図3に示す。これはガウス関数でフィットしてあり、その $\sigma$ はXが2.1 $\mu$ m、Yが4.5 $\mu$ mとなった。この値にはBの位置の不定性だけでなくA,Cの不定性も同時に含まれている。そのため、ABCの精度がすべて等しいという仮定のもとに、Bの精度を算出した。その結果を表1にまとめた。この表にはBCDの組み合わせでCの精度を求めた結果も書かれている。

これらの結果からRF-BPMの精度は5 $\mu$ mかそれ以

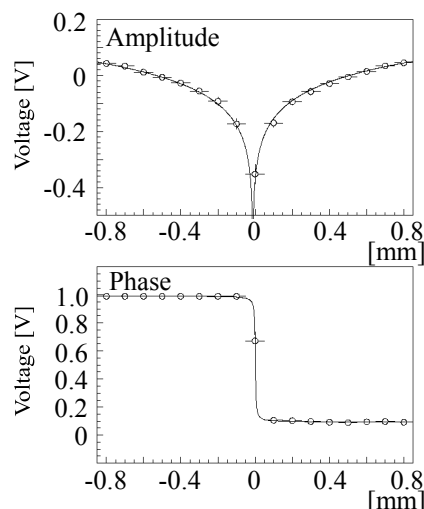


図2：RF-BPMの較正データ。横軸はXYステージの位置をmmで表している。縦軸は上図が振幅で下図が位相である。位相は1.0Vが+90度、0.1Vが-90度に相当する。

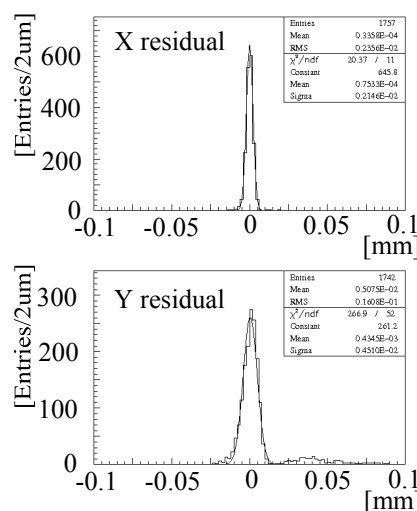


図3：RF-BPMの測定位置と、その上下流のRF-BPMから求めた位置との差。上図がX(水平方向)で下図がY(鉛直方向)である。

表1：RF-BPMの位置精度測定結果

	X resolution [ $\mu$ m]	Y resolution [ $\mu$ m]
B	1.7	3.6
C	5.2	4.9

下であると結論できる。これは試験加速器の要求精度を満たしており、VUV-FELの発振には十分である。しかし、過去の研究結果<sup>[5,6]</sup>やX線FELの必要精度<sup>[1]</sup>とは合わない。今回の測定セットアップは精度を測定するためのものではないので、測定に限界があった。今後、3連のRF-BPMを用意するなどしてより正確に精度を測りたい。

### 3. ビーム電荷検出器：CT

ビームの電荷量を測定するためにCTを用いている。そのハードウェア構成と性能について述べる。

### 3.1 CTのハードウェア構成

CTはBergoz社のFCT-WB-055-10:1<sup>[8]</sup>を用いている。CTからの信号は積分アンプで処理され、波形記憶ADCで読み出される。このCTのパルス立ち上がり時間は300psecで、感度は2.5V/Aである<sup>[8]</sup>。

### 3.2 CTの性能

われわれのビームパルス幅は1psecで、CTの立ち上がり時間より非常に短い。そのため、図4に示したように、CTからの生波形にリングングが存在するなどの影響が出ている。この波形の積分値が電荷に比例するはずであるが、それが十分かどうかを調べた。

CT以外の測定器で電荷量を知っておく必要があるため、試験加速器途中にある50MeV ビームダンプのファラデーカップを用いることとした。その電流値とダンプ手前のCTの測定値と比較した。ファラデーカップの電流はピコアンメータで測定した。

まず、ファラデーカップの電流値の応答直線性をみるため、パルスあたりの電荷量を一定にしたまま加速器の繰り返し周波数を変えてデータを取った。その結果、直線からのずれは最大で10%であった。このように、ファラデーカップの測定はこの誤差の範囲で信頼できることがわかった。

次に、パルスあたりの電荷量を変えるため、スリットでビームを削ってデータをとった。その結果を図5に示す。このプロットは原点を通る直線でフィットしてあるが、電荷が小さいデータ点は直線より下にある。これは、電荷が小さくなるにつれてCTの感度が悪くなっていくことを示している。感度の最大の点と最小の点を比べると約30%の差があった。この程度の誤差をCTが持っていると考えられる。また、フィットされた直線の傾きがCTの感度の値となるが、得られた傾きは2.23V/Aで、カタログ値と比較すると約10%小さい。これが有意かどうかは、現状ではファラデーカップの絶対値の誤差がわからないため断定はできない。

これらの結果から、CTの応答直線性はファラデーカップより若干悪かったが、ビーム調整の用途にはとくに問題にならないと考えられる。ただし、電荷の絶対量が必要な測定の場合、応答直線性のずれを考慮する必要がある。

## 4. まとめ

SCSS試験加速器で使用されているRF-BPMとCTの性能を調べた。RF-BPMの位置精度は5 $\mu$ m以下で試験加速器の要求精度を満たしている。しかし、X線FELの要求精度は満たされていないので、今後さらに信頼度の高い測定を行うなどして、改良点を見出したい。CTの感度についても調べたが、感度の誤差がビーム調整に与える影響は問題にならないことが確かめられた。

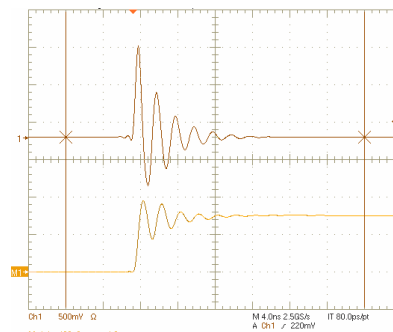


図4：CTの波形のオシロスコープ画像。横軸は4ns/divである。上がCTの波形で500mV/div，下はその積分値である。

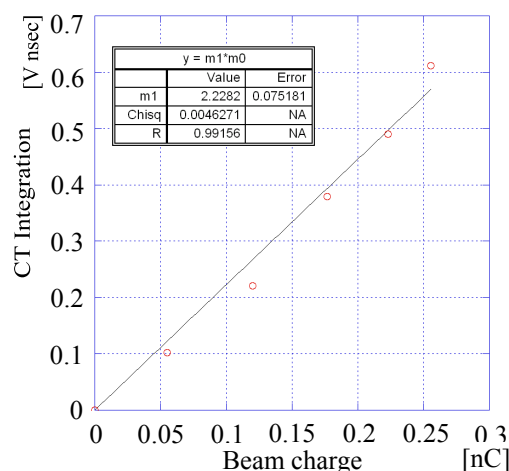


図5：パルスあたりの電荷量とCT波形の積分値との比較。横軸がファラデーカップで測った電荷量で縦軸がCTの積分値である。

これらの測定器を用いてVUV-FEL発振のためのビーム調整を行った結果、40-60nmのFEL増幅の観測に成功した。このことは、RF-BPMやCTの性能が十分であったことの証拠であるといえる。

## 参考文献

- [1] SCSS Conceptual Design Report, <http://www-xfel.spring8.or.jp/SCSSCDR.pdf>
- [2] T. Shintake, "Status of SCSS X-FEL Project at RIKEN/SPRING-8", Proc. 2nd Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] T. Shintake *et al.*, "Status of The SCSS Test Accelerator And XFEL Project in Japan", proceedings of 10<sup>th</sup> biennial European Particle Accelerator Conference (2006).
- [4] T. Shintake *et al.*, "Status of SCSS Test Accelerator And XFEL Project in Japan", in these proceedings.
- [5] T. Shintake, "Development of Nanometer Resolution RF-BPMs", Proc. HEAC 1999.
- [6] T. Slaton and T. Shintake, "Development of Nanometer Resolution C-band Radio Frequency Beam Position Monitor in The Final Focus Test Beam", SLAC-PUB-7921, 1998.
- [7] T. Ohata *et al.*, "The Control System of The SCSS Prototype Accelerator", in these proceedings.
- [8] Bergoz Instrumentation, "FCT: Fast Current Transformer", <http://www.bergoz.com/Products/FCT/d-fct.html>