

# 蛍光検出型放射光 X 線ビーム位置モニター

工藤統吾  
西野吉則

財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター  
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

井上 忍  
石川哲也

財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター  
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

**要旨** チタン箔からの蛍光 X 線を利用した高輝度放射光 X 線ビーム位置モニターを開発した。本ビーム位置モニターは複数の PIN ダイオードを検出器として用いており、従来の PSIC（位置敏感型電離箱）と比べると大強度 X 線ビームにおいても線形性が保たれるという利点をもつ。ビームラインでテストした結果、本ビーム位置モニターは 0.2  $\mu\text{m}$  以下の位置分解能を有することが確認された。また分光器安定化システム（MOSTAB）と組み合わせることで、ビーム位置変動が標準偏差で 4.9  $\mu\text{m}$  から 0.5  $\mu\text{m}$  に抑制された。

## 1. はじめに

第 3 世代放射光源の性能を十分に引き出し「使い切つてゆく」ために放射光 X 線ビーム位置の安定度は極めて重要である。このため SPring-8 では軌道安定化<sup>1)</sup>や Top-up 運転<sup>2)</sup>など光源加速器の安定化への努力とともに、光学系特に分光器の安定化について様々な努力がなされてきた<sup>3,4)</sup>。2 結晶分光器が冷却系配管の振動などにより不安定化すれば、ビーム位置変動を引き起こす。これは集光系を用いたマイクロ（ナノ）ビーム形成における設計上の光源点（フロントエンドスリットや挿入光源の中心部など）を狂わせる要因になり、空間コヒーレンスの低下につながる<sup>5)</sup>。また実験ハッチでは数十ミクロン以下のスリットサイズを用いてビーム整形を行うことが多く、ビーム位置の変動はスリット後のビーム強度の変動となる。

我々は分光器の振動やドリフトに起因するビーム不安定性の改善に Monochromator Stabilization: (MOSTAB) が有効であることを確認し<sup>6,7)</sup>、現在 SPring-8 の多くのビームラインに MOSTAB が導入されている。MOSTAB は 2 結晶分光器の結晶の平行度を閉ループフィードバックで制御して、分光器下流での X 線ビームの安定化を行うシステムである。MOSTAB は元来ビーム強度安定化の技術として開発されたが<sup>8)</sup>、我々は位置敏感電離箱 (PSIC: Position Sensitive Ionization Chamber)<sup>9)</sup>との組み合わせによりサブミクロンオーダーのビーム位置安定化にも応用できることを確認した<sup>6,7)</sup>。しかし PSIC は大強度の X 線ビームに対してイオンの再結合による飽和現象により線形性を

失い、ビーム位置演算値の S/N 比が著しく減少する。そのため挿入光源光でのビーム位置計測に用いることができない場合がある。

本稿では挿入光源用の新しいビーム位置モニターの一つである蛍光検出型放射光 X 線ビーム位置モニターを紹介する。これは APS で先行して開発改良が進められているものであり<sup>10,11)</sup>、金属箔に X 線ビームが透過して発生する蛍光 X 線を複数の PIN フォトダイオードで検出してビーム位置を算出するものである。このビーム位置モニターは広ダイナミックレンジの高輝度放射光用ビーム強度モニター<sup>12)</sup>を発展させて開発されたものであり、挿入光源光のビーム位置計測に有利であると考えられる。またこのビーム位置モニターはソフトウェアベースの分光器制御でビーム安定化にも用いられている<sup>13)</sup>。以下、SPring-8 において我々が行った同モニターの試作試験と、その MOSTAB への適用結果につき述べる。

## 2. モニターの原理と構成

本ビーム位置モニターは X 線を透過させる金属箔（ここではチタン箔）と、チタン箔から発生する蛍光 X 線の検出器（PIN フォトダイオード）からなる（Fig. 1）。図の左側から Ti の K 吸収端 4.966 keV 以上の X 線ビームビームがチタン箔に入射すると、箔上のビーム入射点から蛍光 X 線（ $K\alpha$  線：4.51 keV）が等方的に発生する。この蛍光 X 線を、チタン箔からみてビームライン上流側に配置した 2 個の PIN フォトダイオードが検出する。PIN フォト

ダイオードを箔の上流に配置する理由は、下流配置の場合チタン箔から発生する回折X線が形成する powder (Debye-Sherrer) ring の影響が大きく、位置精度が悪化するからである<sup>10)</sup>。

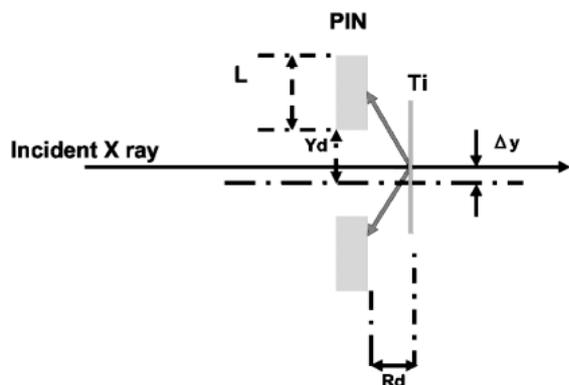
チタン箔を蛍光体として用いる X 線ビーム位置モニター (X-ray beam position monitor: XBPM) であることから、以下このモニターを Ti-XBPM と略記する。チタン箔上のビーム入射点の位置が変わると、2つの PIN フォトダイオードが検出する蛍光 X 線の強度比が変わる。ここで2つの PIN フォトダイオードの信号強度を  $i_1$  および  $i_2$  とすると、ビームが2つの PIN フォトダイオードから等距離の位置を通過する時は  $i_1 = i_2$  となる。この時のビーム位置を Ti-XBPM の原点とする。但しここで2つの PIN フォトダイオードの検出効率等は等しいとする。原点からの光軸のずれ量  $\Delta y$  が小さい場合は、 $i_1$ ,  $i_2$  及び  $\Delta y$  の間には式(1)の関係が成り立つ。

$$\Delta y = k \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \quad (2)$$

ここで  $k$  は実験的に求める比例定数である。

Ti-XBPM を透過した X 線ビームは下流において実験に用いられる。従って蛍光体の金属箔はできる限り薄くし、用いるビームエネルギー範囲での X 線透過率を上げる必要がある。我々は  $5 \mu\text{m}$  厚のチタン箔 (NIRAKO 製) を用いた。 $5 \mu\text{m}$  厚 Ti 箔は、例えば  $12 \text{ keV}$  での X 線透過率が  $86\%$ 、 $24 \text{ keV}$  では  $98\%$  であるが、より薄い箔を用いれば更に吸収によるロスが少なくなる。また逆に高エネルギー X 線ビーム位置計測においては、吸収率の減少に伴い蛍光強度が減少する。この場合は箔の厚さの調整や、材質の変更などにより蛍光強度を増大させて対応する<sup>10)</sup>。

PIN フォトダイオードとしてここでは浜松ホトニクス の S3590-09 を光電池モードすなわち無バイアス電圧で用



**Fig. 1** Geometrical configuration of Ti-XBPM. Yd: distance between the bottom of a PIN photodiode and the center of two diodes. L: active length of the PIN photodiode. Rd: horizontal distance between the Ti-foil and PIN photodiode.  $\Delta y$ : beam shift from the origin of the Ti-XBPM.

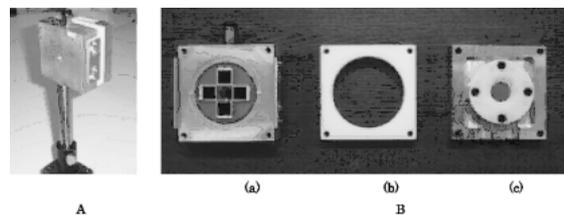
いる。光電池モードの PIN フォトダイオードは広ダイナミックレンジであり、放射光 X 線強度測定に頻繁に用いられている<sup>15)</sup>。

### 3. モニターの設計製作と性能

**Fig. 1** に示された各部寸法を、フォトダイオードの実効長  $L = 10 \text{ mm}$ 、原点とフォトダイオードの端までの距離  $Yd = 6.71 \text{ mm}$ 、金属箔とフォトダイオードの水平距離  $Rd = 8.89 \text{ mm}$  として製作した Ti-XBPM を **Fig. 2** に示す。

**Fig. 2A** は光学ロッドに取り付けた本体外観である。**Fig. 2B** は本体を3つのパーツに分解したものである。**Fig. 2B** の左から順に、(a) PIN フォトダイオードホルダー部、(b) ジュラコンスペーサ部、(c) チタン箔ホルダー部である。2次元のビーム位置情報が得られるように(a)においてPIN フォトダイオード4つを上下左右に配置した。4つのPIN フォトダイオードは、G10ガラス基板上に半田付けされ、アクリル製押さえ具により位置が固定されている。(b)のジュラコンスペーサは  $Rd$  を正確に決定するために挿入される。(c)のチタン箔ホルダーは、テーパ状のジュラコン押さえ具によりチタン箔を平面に保持する。このテーパ状ジュラコン押さえ具の取り付けねじはアクリル製のものを用いた。本品は株式会社帝国電機製作所<sup>16)</sup>により製作された。アクリル及びジュラコン (ポリアセタール樹脂) は、本体を構成するアルミニウムからの蛍光 X 線ノイズを吸収する。

**Fig. 2B(a)** のビーム入射口をポリイミドフィルムでシールすると本体内部は密閉となる。この状態で内部にヘリウムガスをフローしチタン箔の酸化を防止する。ヘリウム雰囲気中で、X 線照射による光電効果で Ti 箔および本体金属部がチャージアップするとしばしば放電が起きる。これを防止するため本体金属部をアースする。PIN フォトダイオードの出力電流信号は本体側面の LEMO コネクターから取り出し、電流電圧変換アンプにて電圧信号とし、AD ボードなどにより数値化した後(1)式により  $\Delta y$  を得る。ここで4個の PIN フォトダイオードのうち、上下に



**Fig. 2** Photographs of a Ti-XBPM. A: Ti-XBPM mounted on an optical rod. B: (a) photodiode holder, (b) spacer, (c) Ti-foil holder. The x-ray beam passes through a 9 mm diameter central hole of (a), and transmits the Ti-foil on (c). Fluorescent x-rays from the Ti-foil are detected using the four PIN photodiodes on (a). Helium gas flows in the Ti-XBPM to prevent the oxidation of the Ti-foil.

配置されたもの 2 個を用いて計算すると垂直ビーム位置が、左右に配置されたもの 2 個を用いて計算すると水平ビーム位置が得られる。

Fig. 3 は BL46XU において、12 keV~24 keV 単色光 X 線ビームに対して Ti-XBPM を水平方向に駆動しながら水平方向のビーム位置を測定したものである。グラフ縦軸はステージの移動量 (すなわちビームシフト量  $\Delta y$ )、横軸は  $(i1-i2)/(i1+i2)$  である。  $-1\text{ mm} < \Delta y < 1\text{ mm}$  におけるこのグラフの直線性からのずれはいずれのビームエネルギーにおいても 5% 以下であった。ただし原点でのグラフの傾斜 (即ち式(1)の  $k$ ) は、このエネルギー範囲内で 17% 変化した。これは散乱 X 線の混在による影響と考えられる。ビームエネルギーにより蛍光 X 線と散乱 X 線の強度比は変化する。また蛍光 X 線の 3 次元プロファイルは入射ビームエネルギーに依存しないが、散乱 X 線の 3 次元プロファイルは入射ビームの偏光度とエネルギーに応じて変化する。これらにより  $k$  値はビームエネルギー

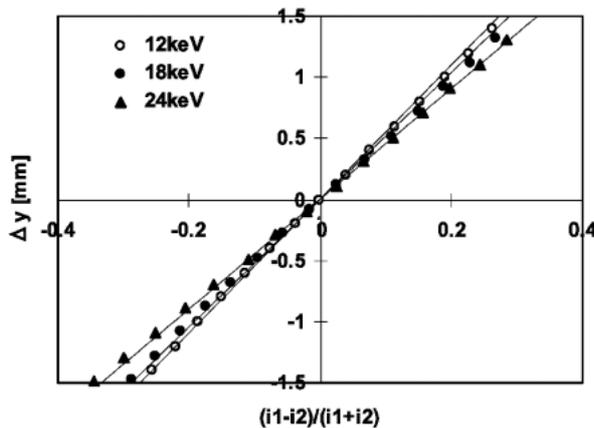


Fig. 3 Horizontal beam position sensitivities of a Ti-XBPM for 12, 18 and 24 keV synchrotron radiation x-ray beam monochromatized using a Si 111 double crystal monochromator. The measurement was performed at BL46XU.

ギー依存性を持つ。したがって、ビームエネルギー変更毎のキャリブレーションにより  $k$  値を求めてビーム位置計算を行う必要がある。

Fig. 4 は BL29XU 実験ハッチにおいて、PSIC と Ti-XBPM をタンデムに配置し、垂直方向ビーム位置を同時測定したものである。(a) は二結晶分光器の分光結晶を完全平行としてビーム強度を最大化した場合、(b) は第一結晶をデチューニングしてビーム強度を最大の 50% とした場合である。ビーム強度最大の場合 (a) は PSIC が線形性を失うことで S/N が悪化した。ビーム強度を 50% とした場合 (b) は PSIC と Ti-XBPM の測定値はよく一致した。(b) の条件において PSIC と Ti-XBPM で測定された各点でのビーム位置の差の標準偏差は  $0.2\ \mu\text{m}$  であった。したがって双方のモニターともに (b) の条件では  $0.2\ \mu\text{m}$  以下の分解能を有すると考えられる。大強度 X 線ビームでの S/N がよいことから、Ti-XBPM は PSIC よりも挿入光源光のビーム位置測定において有利と考えられる。

### 3. MOSTAB によるビーム位置の安定化

BL46XU 実験ハッチ において Fig. 5 の構成で Ti-XBPM と MOSTAB によるビーム位置安定化を行った (Fig. 6)。Fig. 5 の中で MOSTAB と記して囲った部分は専用のフィードバック回路 MOSTAB-PID01 (帝国電機製作所製<sup>16)</sup>) を利用した。本回路には式(1)に則った演算処理が含まれており、ビーム位置安定化のシステムが容易に構成できる。MOSTAB により水平ビーム位置変動の標準偏差は  $4.9\ \mu\text{m}$  から  $0.5\ \mu\text{m}$  に減少した。BL46XU の 2 結晶分光器は傾斜配置型の結晶を用いているので、第一結晶の  $\Delta\theta$  (デチューニング角) 調整によりビーム位置は主として水平方向に動く。従ってここではビームの水平方向の安定化が実現された。

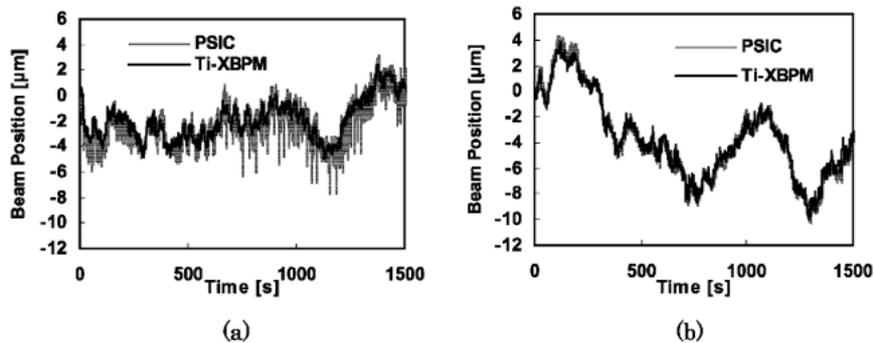


Fig. 4 Vertical beam position fluctuations in 1500 seconds measured using a tandem of PSIC and Ti-XBPM at the experimental hutch of BL29XU. Each measurement point stands for the averaged position over 1 s. The beam energy was 10 keV monochromatized using a Si 111 double crystal monochromator; (a) double crystal monochromator was tuned at the maximum intensity of the rocking curve; (b) double crystal monochromator was detuned to 50% of the maximum intensity of the rocking curve in order to restore the linearity of PSIC.

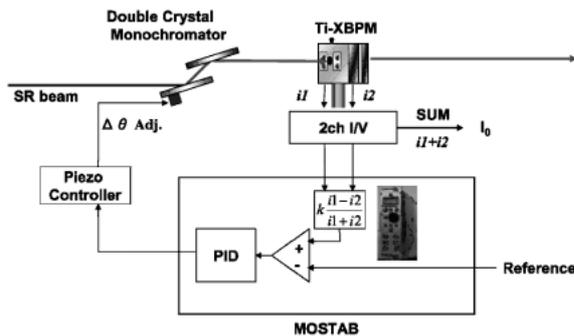


Fig. 5 Schematic diagram of a beam position stabilization system with MOSTAB and Ti-XBPM. Ti-XBPM provides current signals from PIN photodiodes. The signals are converted to voltage signals, and fed to a MOSTAB module “MOSTAB-PID01<sup>15)</sup>”. The MOSTAB module provides a control voltage for a piezo electric translator that controls the detuning angle of the first crystal of the double crystal monochromator. Thus the beam position measured by the Ti-XBPM is stabilized.

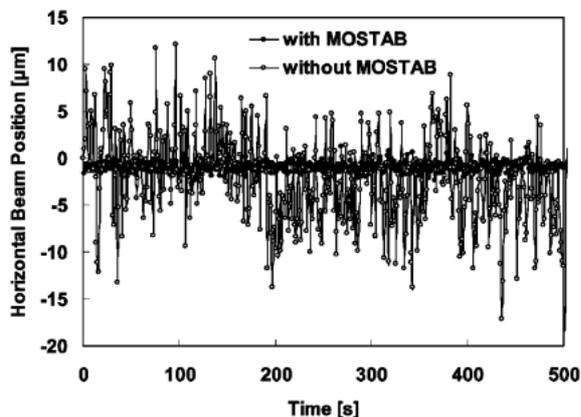


Fig. 6 Beam position stabilization using a MOSTAB and a Ti-XBPM at the BL46XU experimental hutch. The standard deviation of the beam position measured by the Ti-XBPM was reduced from 4.9  $\mu\text{m}$  to 0.5  $\mu\text{m}$ . The beam energy was 24 keV monochromatized using a Si111 double crystal monochromator.

#### 4. 運用の現状と今後の展望など

本ビーム位置モニターは現在 SPring-8 の複数のビームラインで MOSTAB とともに運用されビーム位置安定化に貢献している。特にマイクロビームを用いた実験で力を発揮している。ここで紹介したものは大気圧で使用するものであるが、真空仕様のものを現在開発中である。MOSTAB によるビーム位置制御は一次元に限られており、制御できない方向については不安定性が残る。また以前から指摘されているとおり<sup>6)</sup>光源加速器の安定性が不十分な場合には、MOSTAB を用いたビーム位置安定化はむ

しろビーム強度やエネルギーの不安定化を引き起こすことがある。今後は光源を考慮したフィードバック制御を目指す必要がある。このため分光器上流のビーム位置を高精度計測できるビーム位置モニターの開発などが必要である。

#### 謝辞

モニター本体と読み出し回路の設計製作において、株式会社帝国電機製作所の金本豊和氏、株式会社アイデンの安藤義之氏および白石英洋氏に尽力いただいた。試作品の設計製作および動作試験は JASRI 周辺技術チームの川瀬守弘氏、BL46XU での実験においては担当者の水牧 仁一朗氏、木村滋氏の多大なるサポートを得た。また本モニターの運用の実際につき APS の E. Dufresne 氏から貴重な情報をいただいた。Marcia Obuti 氏に図版等の英文のチェックをしていただいた。本研究は兵庫科学技術協会により支援され、高輝度光科学研究センター R & D 課題 R03B47XU - 0016N, R03B46XU - 0025N, R04A46XU - 0035N として実施された。

#### 文献

- 1) 田中 均: 放射光 **17**, 72 (2004).
- 2) H. Tanaka *et al.*: “Top-up Operation at SPring-8-Towards Maximizing the Potential of a 3rd Generation Light Source”, 9<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference, 5-6 July, 2004 Lucerne.
- 3) T. Ishikawa, H. Yamazaki, K. Tamasaku, M. Yabashi, M. Kuroda and S. Goto: Proc. SPIE **3448**, 2 (1998).
- 4) K. Tamasaku, M. Yabashi, D. Miwa, T. Mochizuki and T. Ishikawa: Proc. SPIE **4782**, 132 (2002).
- 5) 鈴木芳生: Spring-8 年報 **76** (2002).
- 6) Y. Nishino, T. Kudo, M. Suzuki and T. Ishikawa: Proc. SPIE **5195**, 94 (2003).
- 7) 工藤統吾, 西野吉則, 鈴木基寛, 谷田 肇, 古川行人, 広野等子, 石川哲也: 放射光 **16**, 173 (2003).
- 8) A. Krolzig, G. Materlik, M. Swars and J. Zegenhagen: Nucl. Instr. Meth. **219**, 430 (1984).
- 9) K. Sato, H. Toyokawa, Y. Kohomura, T. Ishikawa and M. Suzuki: Proc. SPIE **3774**, 114 (1999).
- 10) R. W. Alkire, G. Rosenbaum and G. Evans: J. Synchrotron Rad. **7**, 61 (2000).
- 11) E. M. Dufresne, J. A. Guzman, S. B. Dierker, R. Clarke, D. A. Arms and D. A. Walko: AIP conference proceedings **705**, 679 (2004).
- 12) R. W. Alkire and F. J. Rotella: J. Appl. Cryst. **30**, 327 (1997).
- 13) K. Lararski, R. W. Alkire, N. E. C. Duke and F. J. Rotella: AIP conference proceedings **705**, 612 (2004).
- 14) <http://www.mhatt.aps.anl.gov/research/publications/reports/Guzman2001.pdf>, “A UHV X-ray Beam Positioning System Using a quadrant PIN Photodiode Array”, Jesse Guzman, August 2001.
- 15) 張小威, 杉山 弘, 依田芳卓: 放射光 **14**, 292 (2001).
- 16) 株式会社帝国電機製作所 〒679-4395 兵庫県揖保郡新宮町平野60番地 電話0791-75-0471

● 著者紹介 ●



**工藤統吾**

高輝度光科学研究センター 副主幹研究員

E-mail: kudo@spring8.or.jp

専門：回路技術などをベースとした放射光技術分野での装置開発

**【略歴】**

1989年筑波大学大学院修士課程医科学研究科学修了，住友製薬株式会社（現：大日本住友製薬株式会社），ツジ電子株式会社をへて1996年より現職。



**井上 忍**

E-mail: inoues@spring8.or.jp

専門：機械設計など

**【略歴】**

1998年信州大学繊維学部機能機械学科卒業。株式会社ヤスナ設計工房入社。2002年9月スプリングエイトサービス株式会社入社。財団法人高輝度光科学研究センターに業務協力員として勤務。



**西野吉則**

理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター・先任研究員

E-mail: nishino@spring8.or.jp

専門：X 線光学，X 線顕微法

**【略歴】**

1996年大阪大学大学院理学研究科博士課程修了，理学博士。1996年-2001年財高輝度光科学研究センター。1998年-2000年ハンブルク放射光研究所客員研究員。2001年4月より現職。



**石川哲也**

理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター 副センター長

E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

専門：X 線光学

**【略歴】**

1982年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。工学博士。高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助手，東京大学工学部助教授，理化学研究所・マイクロ波物理研究室主任研究員を経て，X 線干渉光学研究室主任研究員。加速器工学，X 線光学等の研究に従事。本年10月より理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター副センター長。

## A fluorescence-based synchrotron radiation X-ray beam position monitor

**Togo P. KUDO**

**Yoshinori NISHINO**

**Shinobu INOUE**

**Tetsuya ISHIKAWA**

SPring-8/JASRI, Kouto 1-1-1, Sayo, Sayo, Hyogo 679-5198

SPring-8/RIKEN, Kouto 1-1-1, Sayo, Sayo, Hyogo 679-5148

SPring-8/JASRI, Kouto 1-1-1, Sayo, Sayo, Hyogo 679-5198

SPring-8/JASRI, Kouto 1-1-1, Sayo, Sayo, Hyogo 679-5198

SPring-8/RIKEN, Kouto 1-1-1, Sayo, Sayo, Hyogo 679-5148

**Abstract** A fluorescence-based beam position monitor using a Titanium foil for high flux synchrotron radiation x-ray beams has been examined. It provided a position resolution of less than  $0.2 \mu\text{m}$ . Using a combination of a monochromator stabilization technique and a beam position monitor, the beam position fluctuation was reduced from  $\sigma = 4.9 \mu\text{m}$  to  $\sigma = 0.5 \mu\text{m}$ .