

# RFSocを使ったストリップライン型 BPM 用検波器の開発と評価

## DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN RFSoc BASED STRIPLINE BPM READOUT HARDWARE PROTOTYPE

Bela Urbschat<sup>\*,A,B)</sup>, 三塚 岳<sup>B)</sup>, Larry Ruckman<sup>C)</sup>  
Bela Urbschat<sup>\*,A,B)</sup>, Gaku Mitsuka<sup>B)</sup>, Larry Ruckman<sup>C)</sup>  
A) Nagoya University  
B) KEK  
C) SLAC

### Abstract

We have developed a Stripline BPM readout device based on an AMD/Xilinx RFSoc chip which integrates multiple ADCs, DACs, a large scale FPGA, and an ARM processor in a single package. The developed device is intended for use at the beam transfer line connecting the KEK injector Linac to the SuperKEKB collider rings. SuperKEKB will operate at unprecedented luminosities requiring very high beam currents. To reach and maintain such currents, high injection efficiency is essential which in turn requires precise tuning of the injection process. The RFSoc based BPM will provide a highly flexible platform for beam orbit measurements near the injection point required for the tuning. One objective is to enable the separate resolution of the orbit of both bunches in the two-bunch injection mode, where two bunches are accelerated and injected with 96 ns spacing. Additionally, we plan to utilize resulting measurements as inputs for real-time automated injection tuning and feedback to the upstream steering in the beam transport line. Here, we present the status of the development including results from prototype tests conducted at the KEK injector Linac.

## 1. はじめに

SuperKEKB 加速器は  $5.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  という世界最高の瞬間ルミノシティを達成しているが、その更なる向上には大電流ビームを維持する必要がある。また、ビームライフが短いため、入射器から SuperKEKB 加速器への高い入射能力が求められている。入射は最大 25 Hz で行われるが、一度に入射できる電荷を高めるため、一度の入射で 96 ns 間隔の 2 つのバケットに入射する 2 バンチ入射運転が実施されている。入射ビームの調整には入射点直前の BPM が用いられているが、現時点でこの BPM の検波器は 2 バンチ入射運転時の 2 つのバンチ軌道を独立に測定する機能を持たない。そのため、2 バンチ目の入射効率が 1 バンチ目の入射効率に比べて低くなってしまっている。この課題を改善するためには、各バンチ軌道を独立して測定する検波器を作成する必要がある。本研究では AMD/Xilinx 社製の Radio Frequency System on a Chip (RFSoc) [1] を用いた入射点 BPM 用検波器の開発を行っている。

## 2. 検波回路

検波回路には、AMD/Xilinx 社製の第 3 世代 RFSoc を使用する。RFSoc は FPGA と ARM CPU の他に、高性能な ADC と DAC を含む RF Data Converter (RFDC) が搭載されている。特に ADC は  $\text{ENOB}=9.3@4\text{GSPS}$  で性能が非常に高い。サンプリングレートと有効ビット数の両面の観点から性能を評価した調査では最先端の性能を有していることが確認された [2]。

また、検波器に必要なデバイスは全て一つの集積回路にまとめられているため、基板の設計がより簡易に

なり、同じ設計の基板が多くの用途に適する。本研究では市販の評価基板である RFSoc 4x2 (Fig. 1) を使用する。この基板には 4 つの ADC 入力および 2 つの DAC 出力に加えて、トリガー入力用ポートやクロック入力ポートも搭載されている。

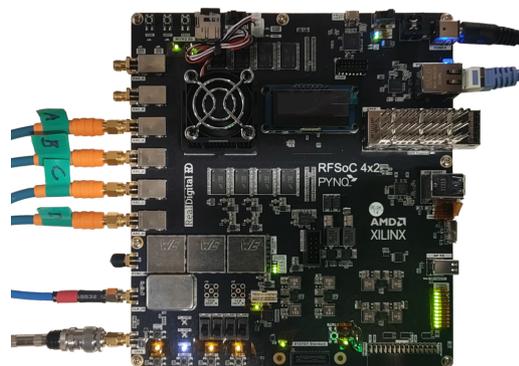


Figure 1: RFSoc 4x2 evaluation board.

## 3. SuperKEKB 入射点 BPM

入射点 BPM はセプタム磁石の直後に位置し、入射点直前の最後の BPM である。入射ビームが通過するチェンバーは蓄積ビームのビームパイプと一体化されており、チェンバーの形状の関係でストリップライン型の電極が上下に 2 個ずつ配置されている。

入射器から SuperKEKB 加速器への入射頻度は最大で 25 Hz である。2 バンチ入射運転の場合、各繰り返しにつき 96 ns 間隔で 2 バンチが入射される。

加えて、入射キッカーが近くに配置されているため、BPM の信号はキッカーによる電磁ノイズの影響を受け

\* urbsch@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

る。適切なフィルターを選定し、ノイズを排除するための工夫が必要である。

電子リングの BPM チェンバーの形状を Fig. 2 に示す。陽電子リングは形状が似ているが、電極の配置が異なっている。

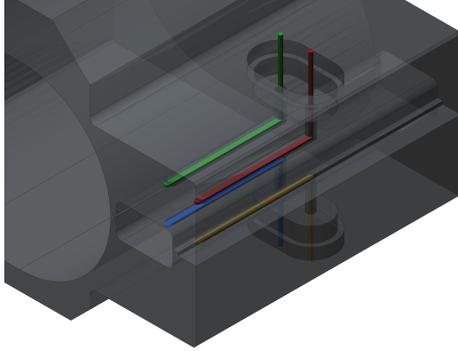


Figure 2: Simplified model of the SuperKEKB injection point BPM chamber (electron ring). The four pickups located on the top and bottom of the chamber are shown in different colors.

### 3.1 境界要素法によるシミュレーション

入射点 BPM はワイヤースキャンが行われていない。境界要素法を用いたシミュレーションで各電極で測定される電圧の大きさをビーム位置  $x, y$  の関数として求める。独自に開発したコードを用いたシミュレーションの結果を Fig. 3 に示す。色で示す電圧の大きさと等値線は対数スケールを使用している。

### 3.2 ビーム位置計算

境界要素法で求めた信号マップをもとに入射ビームの位置を計算する。位置計算の手法として、比較のために2つの異なる方法を実装した。は比較のため、2つの異なる方法を実装した。

1つ目は多項式を用いてビーム位置を表記し、係数を予め信号マップを使ったフィットで求める方法である。それぞれの電極で測定される電圧の大きさを  $s_i$  とし、その差  $\Delta_{ij}$  と和  $\Sigma_{ij}$  を Eq. (1) で定義する。

$$\Delta_{ij} = s_i - s_j, \quad \Sigma_{ij} = s_i + s_j \quad (1)$$

対角に位置する電極の信号のみを使って Eq. (2) に記した多項式でビーム位置の計算を行う。

$$x = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 A_{mn} \left( \frac{\Delta_{02}}{\Sigma_{02}} \right)^m \left( \frac{\Delta_{13}}{\Sigma_{13}} \right)^n, \quad (2)$$

$$y = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 B_{mn} \left( \frac{\Delta_{02}}{\Sigma_{02}} \right)^m \left( \frac{\Delta_{13}}{\Sigma_{13}} \right)^n.$$

ここで、 $A_{mn}$  と  $B_{mn}$  はフィットで求める係数である。

2つ目は信号マップを直接使ってビーム位置を計算する方法である。この手法は高解像度の信号マップを必要とするが、境界要素法を用いたシミュレーションは任意な解像度が設定できるため、その作成が可能である。各電極の信号マップの値を  $s_i^{\text{map}}(x, y)$  と表記す

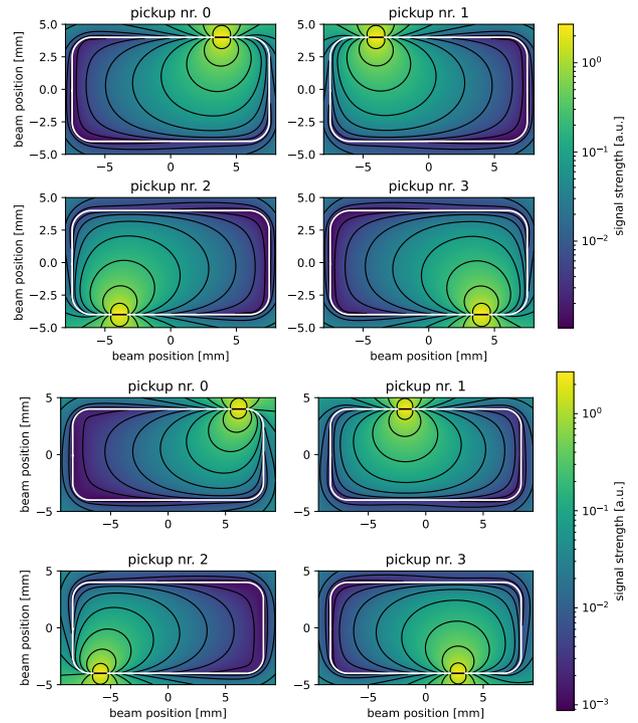


Figure 3: Signal strength maps for each BPM electrode for electron ring (top) and positron ring (bottom) chamber geometries. The used chamber boundary is shown in white. The designated pickup region is colored black.

る。この値は座標  $x, y$  の連続関数でなければならないので、境界要素法で得た離散的なデータを内挿することにより定義する。信号マップと測定する信号のそれぞれの規格化電圧を Eq. (3) で定義する。

$$R_i^{\text{map}}(x, y) = \frac{s_i^{\text{map}}(x, y)}{\sum_{i=0}^3 s_i^{\text{map}}(x, y)}, \quad (3)$$

$$R_i = \frac{s_i}{\sum_{i=0}^3 s_i}.$$

ビーム位置を Eq. (4) で定義した関数が最小になる座標  $x, y$  として求める。

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^3 (R_i^{\text{map}}(x, y) - R_i)^2. \quad (4)$$

この方法は、入射毎に最小化アルゴリズムを実行するため多項式の計算と比べては多くの計算リソースを必要とするが、最大入射頻度の 25 Hz でも問題なく使えることを確認した。

## 4. ファームウェア・ソフトウェア

RFSoc に実装するファームウェアのブロックダイアグラムを Fig. 4 に示す。RFDC のサンプリングクロック及び FPGA のクロックはボード搭載の PLL を用いて SuperKEKB の RF クロック (509 MHz) と同期させる。RFDC から連続的に読み出すデータは FPGA (PL) で

実装するリングバッファに蓄積される。2つのバッファが実装されており、片方がデバッグ用に2μsほどの波形データを蓄える。もう片方は入射ビームによる信号の長さに合わせて300nsほどのデータを蓄積し、入射トリガーが届き次第読み出される。データはそれぞれDMA経由でCPU(PS)に渡す。

ファームウェアに実装されたレジスタはCPU側からの読み書きのためのインタフェースを用意している。DACから出力される波形データもこのインタフェースを用いて設定する。DACは例えば直接ADCにループバックし、主にファームウェアの試験で使用している。

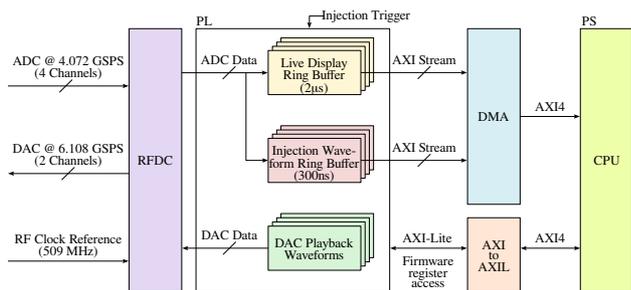


Figure 4: Block diagram of the firmware run on the RFSoc.

CPUはPetalinux上にTCP Bridgeが実装されている(Fig. 5)。FPGAとの通信は専用のカーネルドライバを使用しており、CPUに接続されたイーサネットインタフェースを用いてSuperKEKB制御ネットワーク内のサーバーと通信する。サーバーには全てのレジスタの読み書きとストリームデータ(波形データ)を受信するためのソフトウェアを実装している。RFSocの制御及び波形の処理も全てサーバ側で行う。サーバを通じてリアルタイムでの波形データの可視化またはレジスタアクセスのためのGUIの接続が可能である。一部のレジスタとビーム位置計算の結果は最終的にEPICS PVとして提供する。

ファームウェア及びソフトウェアはSLACが提供するフレームワーク[3,4]を利用している。

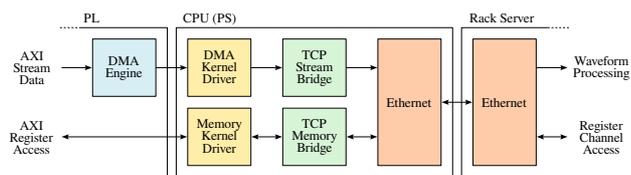


Figure 5: Block diagram of the TCP bridge used for data transfer between the RFSoc board and a rack server running the waveform processing and device control code.

## 5. KEK電子陽電子入射器における試験

2025年6月の入射器の運転で、入射器のストリップライン型BPMに開発したRFSoc検波回路を接続し、検波性能を評価した。RFSoc近く(上流側、最寄りの2箇所)の入射器BPMと付随する検波器を用いてRFSoc地点でのビーム位置を予測し、予測値とRFSoc測定結果の比較によって分解能を導出した。

信号を伸ばすように整形することで、取得可能なサンプル数が増加し、結果として分解能の改善が期待される。そのため、本試験は手持ちのローパスフィルター(Mini-Circuits SLP-450)を使用した。フィルターの周波数は今後最適化する予定である。

25分に渡ってy方向のビーム位置を1.5mmほどスキャンし、データ収集を行った。ここでy方向とは垂直方向を表す。データ解析ではEq. (2)を使ってビーム位置を計算を行い、係数 $A_{mn}$ と $B_{mn}$ は入射器BPMチェンバーのワイヤスキャンによって求められたものを使用した。分解能はRFSoc地点でのビーム位置の予測値と測定値の差の分布から求める(Fig. 6左側)。分布の幅はRFSoc BPM検波器と入射器検波器の両方の分解能に影響されるので、入射器検波器の分解能を3BPM法で別途評価した(Fig. 6右側)。RFSoc地点上流側の最寄り3箇所のBPMの、試験と同じ時間帯のデータを解析し、同じく3つのBPMの内、上流側の2つのデータで軌道を外挿し、残りのBPMでのビーム位置を予測した。また、3つのBPMと付随する検波器が同じ分解能を持つことを仮定した上で解析を行った。

軌道外挿に使用したBPMの分解能を誤差として伝搬させ、Fig. 6左側で示す分布の幅から取り除いてRFSoc BPM検波器を使った場合の分解能を導出した。y方向は9μm程度の分解能を確認した。この分解能は同じ時間帯のデータで測定した入射器BPM検波器の分解能と同等である。入射器のBPMは4μm程度の分解能が確認されているが[5]、運転状況によって低下することがあり、今回の試験は同じく9μm程度となった。

ビーム位置をスキャンしていないx方向の分解能は4μm程度として求まったが、これは信憑性の低い結果だと考えられる。

その理由として、x方向のビーム位置を変更していないためにデータのフィット範囲が狭くなり、本試験では議論対象外としていた外挿フィットに由来する系統誤差の影響が支配的となったことが挙げられる。この影響により、RFSocによる分解能が実際よりも過剰に良く見えていたと推察される。

### 5.1 測定値のドリフトとRFSoc ADCの長期安定性

数時間に渡る測定の場合、測定値のドリフトを確認したが、これはRFSocのADCの不安定性ではなく、測定方法による現象であることを確かめた。

10MHzの正弦波信号をパッシブスプリッターを用いて分岐し、4つのADCに接続した。数日に渡って1秒毎に全チャンネルの300ns程度の波形を保存し、その解析を行った。各信号の絶対値を積分し、チャンネルA・BとC・Dの比を用いてEq. (2)でビーム位置に相当する値を求めた。その平均の有意なドリフトが確認されなかったことから(Fig. 7)、ADC自体が十分に安定していることが示された。

試験で確認されたドリフトはサンプリングクロックとビームタイミングの同期誤差で説明可能である。サンプリングクロックは入射器のRFクロックと同期されていたが、RFクロックの分配経路などの安定性が確認されていないため、同期誤差が発生する可能性があると考えられる。かつ、本試験では信号の適切な整形ができておらず、サンプリングクロックとビームタイ

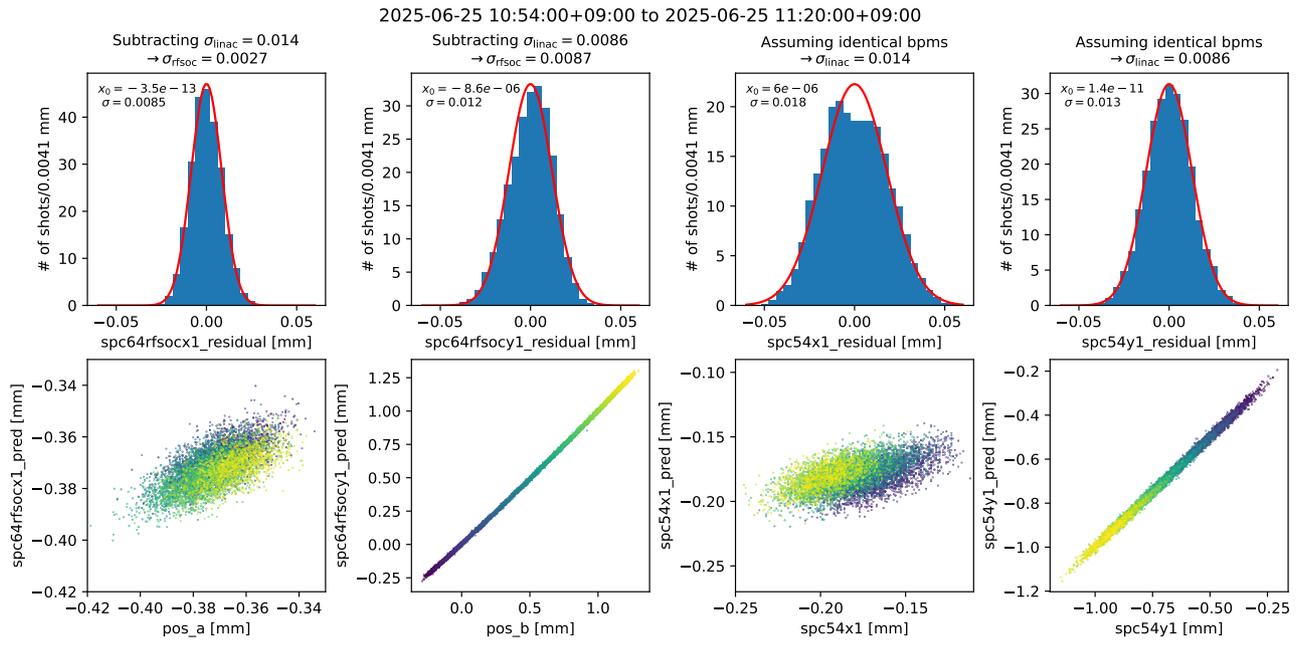


Figure 6: Results of the analysis for resolution estimation. Shown are the residuals (deviation of measured position from predicted position) for RFSoc readout (left) as well as present Linac readout electronics (right).

ミングの同期誤差に非常に敏感であった。

本節のまとめとして、RFSoc およびその内蔵 ADC 自体に問題はないことが確認されたが、サンプリングクロックの影響を抑えるための工夫が必要であることが明らかとなった。具体的には、信号波形の複雑さが不安定性の一因となることが示唆されており、その対策として信号の周波数帯域を可能な限り制限したうえでサンプリングを行うことが望ましいと考えられる。

## 5.2 フィルターの選定

信号の整形は適切なフィルターで行う必要があるが、その選定で参考のできる入射点 BPM の生信号が記録として残っていない。フィルターの選定は 2025 年 11 月から開始される SuperKEKB の次期運転初期に収集されるデータに基づいて行う予定である。フィルターは整形の他にも、入射点 BPM の近くに位置する入射キッカーによる電磁ノイズを排除する役割を担うが、ノイズのスペクトルも次期運転で調査する。

信号の整形は上記の通り、狭い周波数帯が必要なので、バンドパスフィルターを使用する。フィルターの選定方法は入射器 BPM の生信号で検証を行った (Fig. 8)。周波数帯の制限によって信号が伸ばされるため、バンド幅が 2 バンチ入射運転時のバンチ間隔 (96 ns) に基づいて定まる。入射器 BPM の波形の場合には 22 MHz 程度のバンド幅において適切な長さの信号が得られた。

## 6. まとめ

SuperKEKB はルミノシティの更なる向上につながる高いビーム電流の維持のため、非常に高い入射能力を実現する必要がある。そのため、入射ビームの適切な調整が必要だが、現状では 2 バンチ入射運転の場合、バンチ毎の軌道測定が不可能で、入射効率の最適化が困難

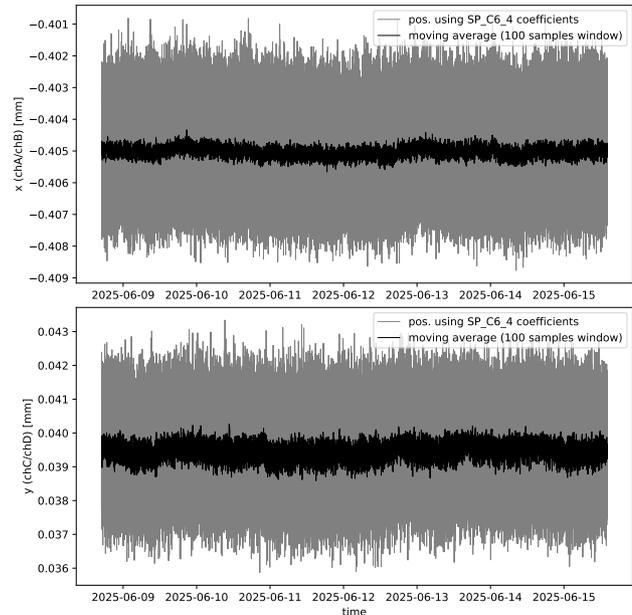


Figure 7: Results of long-term ADC stability check. Measured values are converted to a position equivalent value. The  $x$  position determined from channels A/B is shown on the top, the  $y$  position determined from channels C/D on the bottom.

である。これを解決するため、本研究では RFSoc を用いて入射点 BPM 用の検波器の開発を行っている。KEK の電子陽電子入射器で試作機の性能試験を実施し、十分な分解能が得られることを確認した。

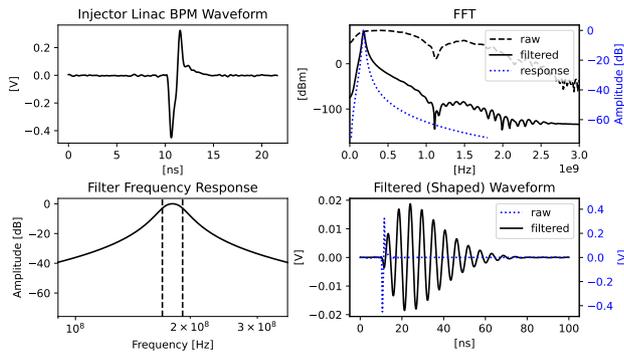


Figure 8: Simulation of a Bessel bandpass filter applied to a BPM signal to shape (stretch) it. Shown are the unfiltered signal, FFTs of filtered and unfiltered signal, filter response as well as filtered signal.

SuperKEKB の次期運転では本装置を入射点 BPM に接続し、運転に活用しながら新たな試験および開発を進める予定である。

## 謝辞

本研究は入射器 BPM を用いた試験において、KEK 電子陽電子入射器の宮原房史准教授にご協力を頂きま

した。この場をお借りして感謝いたします。

## 参考文献

- [1] AMD/Xilinx, *Amd zynq ultrascale+ rfsocs*, <https://www.amd.com/en/products/adaptive-socs-and-fpgas/soc/zynq-ultrascale-plus-rfsoc.html>.
- [2] I. Degl'Innocenti *et al.*, "HI-lhc bpm electronics development as a case study for direct digitization and integrated processing techniques in accelerator instrumentation", in *Proc. IPAC'23*, Venice, Italy, pp. 4657–4660, 2023. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-THPL089
- [3] SLAC, *Axi-soc-ultra-plus-core*, <https://github.com/slaclab/axi-soc-ultra-plus-core/>.
- [4] SLAC, *Rogue*, <https://github.com/slaclab/rogue>.
- [5] R. Ichimiya *et al.*, "High position resolution and high dynamic range stripline beam position monitor (bpm) readout system for the kekb injector linac towards the superkekb", in *Proc. IBIC'14*, Monterey, CA, USA, pp. 637–641, 2014. <http://jacow.org/IBIC2014/papers/wepd04.pdf>