

SuperKEKB 入射器へ向けた BPM データ収集系アップグレード (II) BPM DAQ SYSTEM UPGRADE FOR SUPERKEKB INJECTOR LINAC (II)

佐藤政則^{#,A)}, 工藤拓弥^{B)}, 草野史郎^{B)}, 宮原房史^{A)}, 諏訪田剛^{A)}, 古川和朗^{A)}

Masanori Satoh^{#,A)}, Takuta Kudou^{B)}, Shiro Kusano^{B)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, and Kazuro Furukawa^{A)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd,

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-0045, Japan

Abstract

The KEK electron/positron linac is a 600-m-long injector providing the beams of different energies with four independent storage rings. A non-destructive beam position monitor (BPM) is one of the indispensable diagnostic tools for a long-term stable beam operation. In the KEK linac, approximately one hundred BPMs with the four strip-line type electrodes are utilized for the beam position and charge measurements. The measured beam positions can be utilized for the beam orbit and energy feedback loops. The current BPM data acquisition (DAQ) system comprises 23 fast digital oscilloscopes based on the Windows XP operating system, and its measurement precision is around 30 μm . Toward the SuperKEKB project, the upgrade of injector linac is now going on for increasing the bunched beam charge and reducing the beam emittance. The SuperKEKB injector linac should provide the low emittance electron beam less than 20 mm-mrad for the main ring without a damping ring. For this reason, a high precision of the beam position measurement and control are strongly required. In this paper, we present the system description and the performance evaluation of a new BPM DAQ system in detail.

1. はじめに

KEK の電子・陽電子入射器 (以下, 入射器) は, 異なる入射ビームエネルギーおよび電荷量を要する 4 つのリングへビームを供給してきた。KEKB 電子・陽電子蓄積リングへは, 積分ルミノシティ向上および蓄積ビーム電流値安定化のため, 連続的なビーム入射をおこなってきた。これと同時に, PF リングにおいても, トップアップ入射への要望が高まっていたため, 3 リング (KEKB 電子・陽電子, および PF リング) 同時トップ入射を 2009 年 4 月に実現した^[1-4]。本同時トップアップ入射の実現により, 入射器から供給される 50 Hz (20 ms 間隔) の電子・陽電子ビームを, パルス毎に任意のリングへ入射可能となり, リングにおける物理実験効率が飛躍的に向上した。

KEKB リングの運転は 2010 年 6 月に終了したが, 現在, さらなるルミノシティ増強を目指した SuperKEKB 計画が進行中である。このため, 大電荷量かつ低エミッタンスビームの生成ならびに安定供給を目指して, 入射器の改造を進めている。具体的には, 陽電子ビーム用ダンピングリング, 陽電子ビーム収量増強のためのフラックスコンセントレーター, 低エミッタンス RF 電子銃などの設計, 開発, および試験を精力的に進めている^[5-17]。SuperKEKB 入射器においては, 電子 (陽電子) ビームに要求される垂直方向規格化 rms 射影エミッタンスは 20 (10) mm-mrad 以下である。このような低エミッ

タンスビームの安定輸送のためには, 高精度なビーム位置測定および制御が不可欠となる。

2. BPM データ収集システム

2.1 現システム

入射器では, ビーム軌道およびエネルギー安定化のためのフィードバックシステムを構築し, 安定に運用している^[18-20]。これらのフィードバックには, 約 100 台の 4 電極ストリップライン型 BPM による測定データが用いられる^[21]。BPM の信号処理には, 23 台のデータ収集システムが用いられており, 入射器クライストロンギャラリーに等間隔で分散設置されている。データ収集システム 1 台当たり, 典型的には 4 台分の BPM 信号を処理している。Figure 1 に, 現データ収集システムの概略図を示す。本システムは, 4 チャンネル高速デジタルオシロスコープおよび信号コンバイナーボックスから構成されている。オシロスコープ上では Windows XP が動作し, 4 チャンネル同時計測時の最高サンプリング速度は 10 GSa/s, また, アナログ周波数帯域は 1 GHz である。

1 台の BPM からは, 4 つのアナログ信号が出力される。このアナログ信号波形は, 約 3 ns 幅のバイポーラ信号であり, コンバイナーボックスによって 2 つの信号に合成される (水平方向および垂直方向)。コンバイナーボックス内部では, 半数の信号に対して 7 ns 相当の遅延ケーブルを挿入し, バイポーラ信号の重複を防いでいる。最終的には, 複数の BPM

[#] masanori.satoh@kek.jp

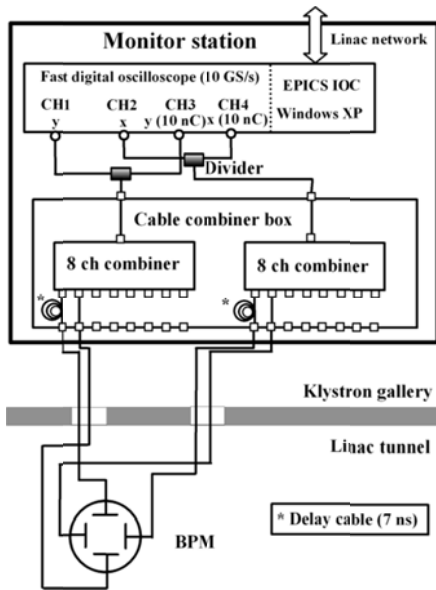


Figure 1: Schematic diagram of the current BPM DAQ system.

から出力される信号が重ね合わされ、バイポーラ信号列からなる波形が形成される。ケーブルコンバイナーボックスの出力信号は再び等分され、オシロスコープの異なるチャンネルへ入力される。これは、0.1 nC から 10 nC という幅広い電荷量のビームを 20 ms 毎に計測するための工夫である。本システムでは、オシロスコープのチャンネル 1 および 2 を小電荷量ビーム (0.1 ~ 1 nC)、また、チャンネル 3 および 4 を大電荷量ビーム (10 nC) の計測に使用する。本方式を用いることにより、オシロスコープの垂直方向測定レンジを変更すること無く、約 100 倍異なる電荷量のビームをパルス毎に計測可能とした。サンプリング周波数 10 GHz で捕捉された波形は、事前に設定した測定ウィンドウ毎に自乗和平方根処理をおこなう。この結果を、各電極からの信号振幅として、ビーム位置および電荷量を算出する。データ収集用ソフトウェアは、各オシロスコープ上において EPICS Input/Output Controller (IOC) として動作している^[22, 23]。

2.2 新システム

新 BPM データ収集システムでは、大電荷量かつ低エミッタンスビーム輸送のため、10 μm 以下のビーム位置測定精度を目指している。また、現システムと同様に、20 ms 毎の 2 バンチビーム同時計測の実現が不可欠である。新システムの候補として、現在開発中の VME-bus 専用モジュールおよび Instrumentation Technologies (I-Tech) 社製の Libera Single Pass Electron (LSPE) システムの導入を検討している^[24]。VME モジュールの詳細な開発状況および試験結果については、本学会にて別途報告されるため、そちらを参照されたい^[25]。

Libera は、近年、世界中の加速器施設で広く採用されている BPM データ収集のための専用システムである。このような基本性能および信頼性の高い製品を基盤とすることにより、開発期間の大幅な短縮および開発リスクの低減が期待できる。LSPE ユニットの、4 つの SMA 型信号入力ポート、高分解能 A/DC (16 ビット, 125 MSa/s) を有する。また、2 段の帯域制限フィルター (中心周波数 500 MHz, 3 dB 帯域幅 10 MHz) として、表面弾性波 (SAW) フィルターを採用している。その他、シングルボードコンピューター (SBC)、FPGA、および可変信号減衰器などから構成される。

本ユニットを基に、SuperKEKB 入射器で要求される 96 ns 間隔の 2 バンチビーム同時計測を実現するため、SAW フィルターの中心周波数、帯域幅をそれぞれ 522 MHz および 24 MHz に変更した。また、サンプリング点数の増加については測定精度の向上を目指して、A/DC のサンプリング周波数を 160 MHz のものに置き換えた。さらに、可変信号減衰器を 20 ms 毎に設定変更するため、ソフトウェアの改良もおこなった。2 段の SAW フィルターを通過したアナログ信号は、約 96 ns 幅の信号に引き延ばされ、A/DC により 6.25 ns 間隔のサンプリング処理がおこなわれる。15 点のサンプリングデータの自乗和平方根を用いて、ビーム位置および電荷量の算出をおこなう。これらのデータ処理はすべて FPGA 上でおこなわれ、計算結果は SBC 上で動作している Linux/EPICS IOC へ転送される。上位のアプリケーションソフトウェアとは、ギガビットイーサネット経由でのデータ通信が可能である。

3. 3-BPM 法による測定精度の評価

3.1 現システム

ビーム位置測定精度の評価には、3-BPM 法を用いた^[21]。本ビーム試験では、PF リング入射用 0.3 nC

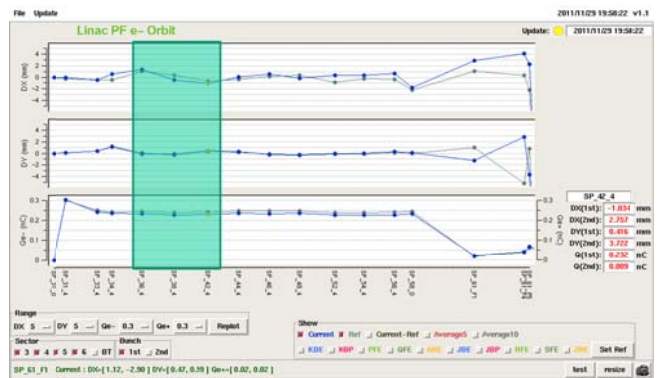
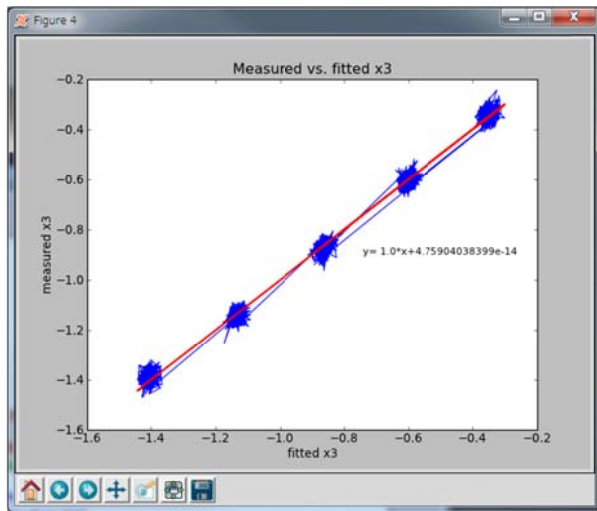


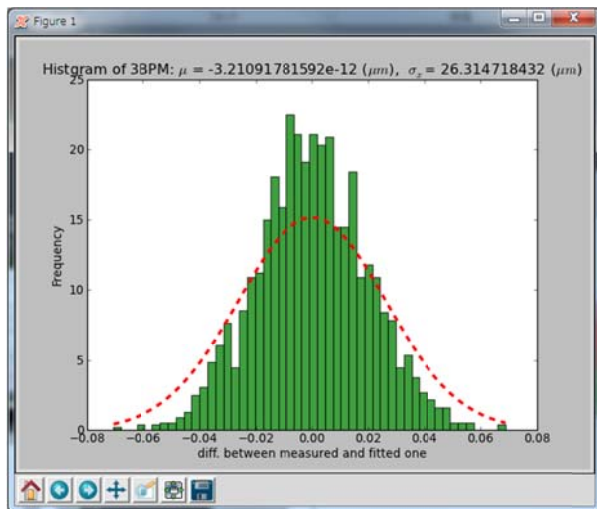
Figure 2: Beam orbit along the KEK linac during the 3-BPM measurement for the both of current oscilloscope and LSPE systems. Here, horizontal (top), vertical (middle) orbits, and beam charge (bottom) are shown. Three adjacent BPMs coloured by light green are used in this 3-BPM experiments.

電子ビームを用い、隣接する 3 台の BPM (BPM#1, #2 および#3) による同期ビーム位置測定をおこなった (Fig. 2)。これらの BPM 上流側に設置されたステアリング電磁石において、5 種類の異なる磁場設定値でビームに意図的な蹴り角を与え、磁場設定値毎に約 400 回のビーム位置測定をおこなった。本測定中、当該 BPM 箇所でのビーム位置変化量は、最大 ± 2 mm 程度であった。

Figure 3 に、水平方向 3-BPM 測定結果を示す。本測定では線形多変量回帰分析を適用し、BPM#1 および BPM#2 での測定結果から BPM#3 でのビーム位置を推定する (Fig. 3 (a))。BPM#3 の測定結果および前述の推定値の残差分布が、3-BPM 法による BPM 位置測定精度を与える (Fig. 3 (b))。同様の測定を、垂直方向についてもおこなった。



(a) Estimated and measured beam positions (horizontal).



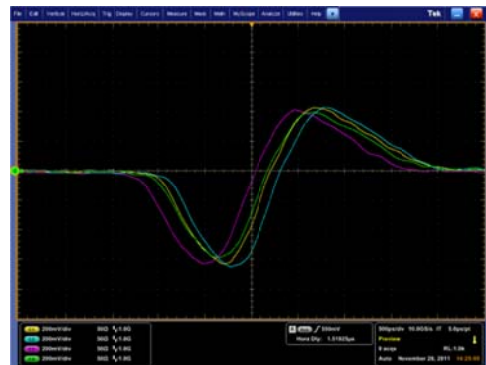
(b) Histogram of residual between the estimated and the measured beam positions (horizontal).

Figure 3: Beam test results of 3-BPM by the current BPM DAQ system in the horizontal direction.

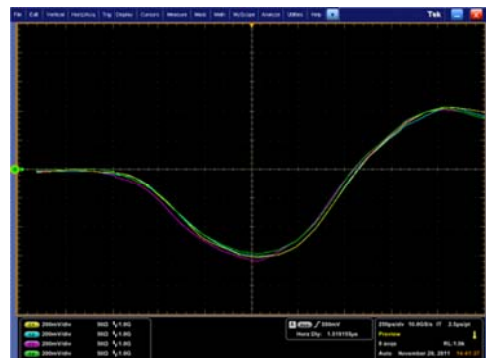
本測定の結果、ビーム位置測定精度は、水平方向 $26.3 \mu\text{m}$ および垂直方向 $25.1 \mu\text{m}$ であった。本測定精度は、オシロスコープで用いられている A/DC の分解能が 8 ビットであることに起因して、制限されている。

3.2 LSPE システム

LSPE を用いた位置測定では、入力波形のチャンネル間位相の精密調整が不可欠である。これは、2 バンチビーム測定を考慮した 96 ns 内でのサンプリング点数が 15 点と少ないためである。Figure 4 に、



(a) Before phase alignment.



(b) After phase alignment.

Figure 4: Raw analog signal from BPM before and after precise phase alignment.

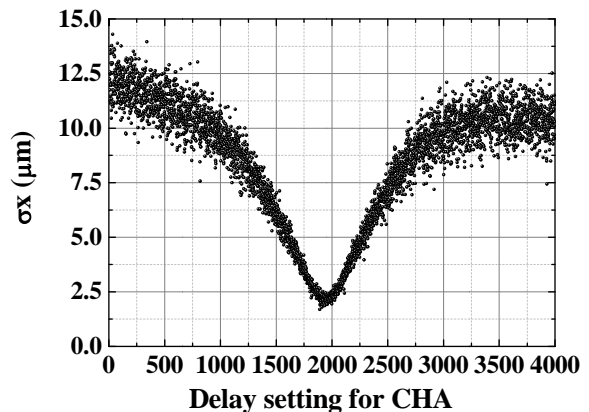
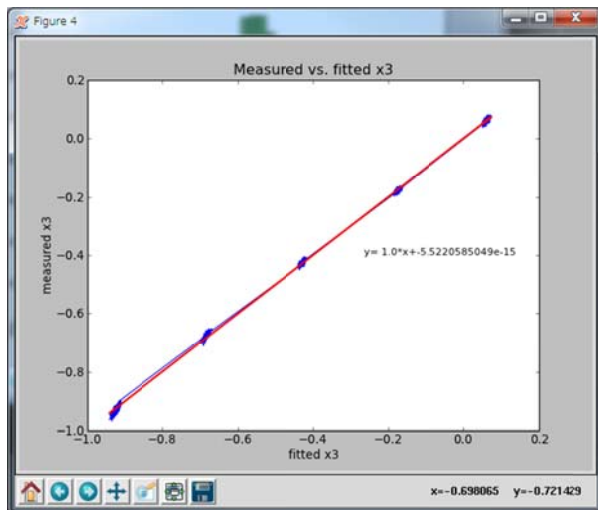


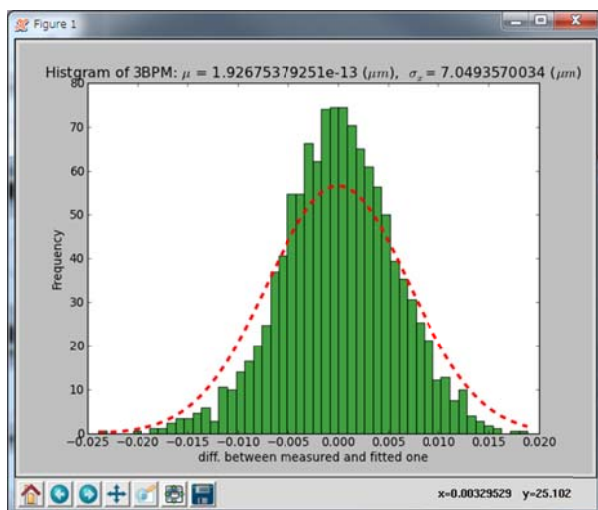
Figure 5: Measurement precision for the different delay setting for the input channel A (CHA) by using a pulse signal generator.

位相調整前 (Fig. 4 (a)) および調整後 (Fig. 4 (b)) の BPM 出力信号波形を示した。トンネル内の BPM 本体からクライストロンギャラリー部に設置されているデータ収集システムまでは、約 35 m 長と同軸ケーブルで接続されている。チャンネル毎のケーブル長差およびコンバイナーボックス内での電気長差に起因して、典型的には 1 ns 程度の信号タイミングのばらつきが見られる。LSPE は、4 個のディレイチップを内蔵しているため、動的なチャンネル間位相制御が可能である。

Figure 5 に、チャンネル A のディレイ設定値を意図的に変化させた場合の測定精度をプロットした。最大ディレイ設定値は 4000 であり、約 2 ns の遅延時間に相当する。本測定では、信号源としてパルス信号発生器を使用し、各測定精度は 100 回の測定値



(a) Estimated and measured beam positions (horizontal).



(b) Histogram of residual between the estimated and the measured beam positions (horizontal).

Figure 6: Beam test results of 3-BPM by LSPE in the horizontal direction.

を用いて算出した。この結果から、チャンネル間位相を最適化することにより、2 μm 以下の測定精度が期待できることが見て取れる。

Figure 6 に、LSPE を用いた水平方向の 3-BPM 測定結果を示す。本測定で使用した BPM およびステアリング電磁石設定値は、オシロスコープによる測定と同一のものである。同様の測定を、垂直方向についてもおこない、水平方向 7.05 μm および垂直方向 7.06 μm のビーム位置測定精度が得られた。これは、目標値である 10 μm を十分満足するものである。

4. その他の性能評価

4.1.2 バンチ目のビーム位置測定精度

Figure 7 に、1 バンチビーム測定時の ADC カウン

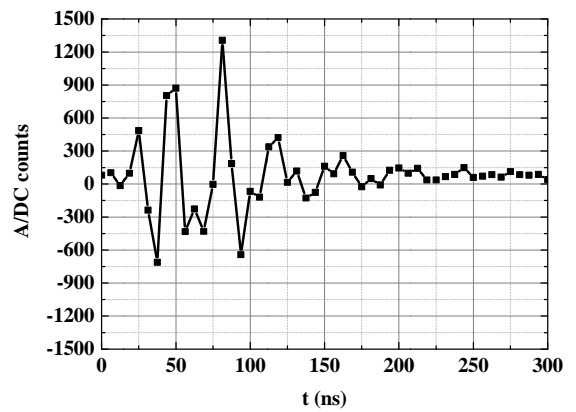


Figure 7: Raw ADC count example of 1st bunch beam measurement.

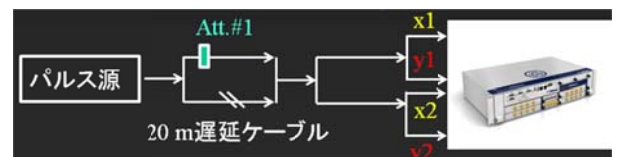


Figure 8: Experimental setup for evaluating the impact of 1st bunch signal leakage on the 2nd bunch measurement.

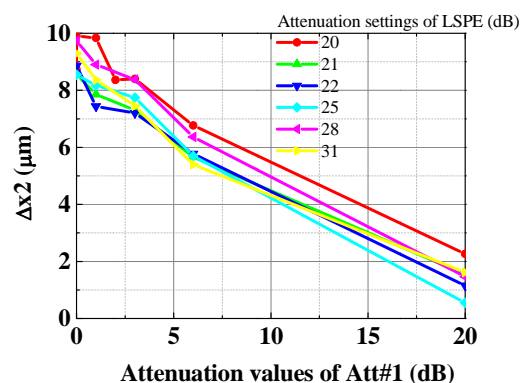


Figure 9: Measurement accuracy of 2nd bunch beam position for the different 1st bunch signals.

ト例を示す。SuperKEKB リングへのビーム入射では、入射器において、1 バンチ目のビームから 96 ns 後に 2 バンチ目のビームを生成および輸送する必要がある。Figure 7 より、1 バンチ目のビームが BPM に誘起する信号の一部が 2 バンチ目のビーム信号と重なり、2 バンチ目のビーム位置測定精度の低減が予想される。

定量的な評価をおこなうため、Fig. 8 の様な測定セットアップを用い、1 バンチ目のビーム信号強度変動に起因した 2 バンチ目の測定ビーム位置変化を評価した。具体的には、パルス信号発生器の出力を二等分し、一方に約 20 m 長の遅延ケーブルを挿入することにより、96 ns 遅延した 2 バンチ目ビーム信号を擬似的に再現した。本測定では、Fig. 8 における Att.#1 の信号減衰量を意図的に変化させ、2 バンチ目のビーム位置を測定した。

Figure 9 では、Fig. 8 における Att.#1 部においてケーブルを開放した場合の測定結果を、2 バンチ目のゼロビーム位置と定義した。本図において、異なる色のプロットは、LSPE 内部の信号減衰器設定値を 20 ~ 31 dB まで変化させた結果である。本測定結果より、1 バンチ目のビーム電荷量が増加した場合、2 バンチ目のビーム位置測定精度に与える影響は、最大 10 μm 程度であることが見積もられる。また、別の測定セットアップを用いて、1 バンチ目のビーム位置変化に対する 2 バンチ目測定位置変化の割合を測定した結果、3.44%であった^[26]。これは、1 バンチ目のビーム位置が 100 μm 変化した場合、2 バンチ目のビーム位置測定精度に 3.44 μm の誤差が生じることを意味している。これらの測定結果は、実運用上、十分許容可能であると考えている。

4.2 長期安定性評価

長期安定なビーム位置測定は、実運用上最も重要な性能指標の一つである。特に、環境温度の変化に対して、チャンネル間の利得バランスが変動した場合、ビーム位置測定精度の劣化を招く。このような利得変動が顕著な場合、なんらかの方法を用いた動的な自己較正をおこなう必要がある。現在開発中の VME モジュールでは、このような機能の実装を検討中であるが^[25]、LSPE には現在のところ実装されていない。

ビーム位置測定の長期安定性を評価するため、Fig. 10 の様な測定セットアップを用いた。パルス信号発生器の出力信号を 4 等分配し、LSPE の各チャンネルに入力した。パルス信号発生器は入射器トンネル内に設置し、クライストロンギャラリー部に設置した LSPE とは、実運用に使用している 35 m 長の同軸ケーブルを用いて接続した。本測定は、ビームが BPM の中心を通過している状況を擬似的に再現し、長期間にわたる測定精度を評価したものである。

Figure 11 に、水平 (黒) および垂直 (赤) 方向測

定結果とともに、トンネル内 (青) およびクライストロンギャラリー部 (緑) での温度測定結果も併せて表示した。本図は、1 Hz でおこなった測定結果を基に、5 分間 (300 点) の移動平均をプロットしたものである。

本測定は、入射器夏期保守期間中におこなったため、夜間は空調機器が停止している。このため、クライストロンギャラリー部およびトンネル内の環境温度に、それぞれ、4.5°C および 1.5°C 程度の変動が見られる。これに起因して、チャンネル間に利得変化が生じるため、位置測定結果に変動が見られることになる。Figure 11 の結果から、環境温ほぼ度が一定に保たれていない状況下においても、測定位置変動は $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内に収まっていることが見て取れる。実際のビーム運転中は、24 時間環境温度が一定に保たれることを鑑みると、本測定結果は実運用上問題が無いと考えられる。ただし、年間を通じた緩やかな温度変動に起因する影響は、別途、詳細な検証が必要である。

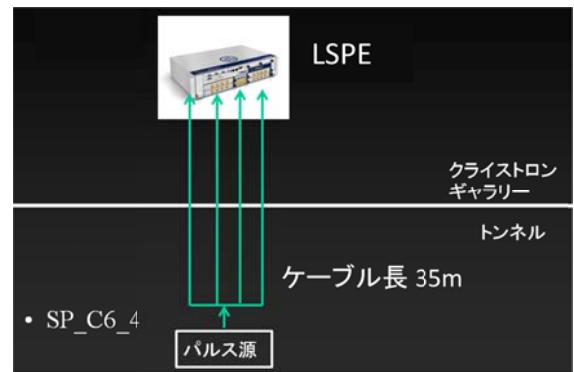


Figure 10: Experimental setup for evaluating the long-term stability of measurement accuracy.

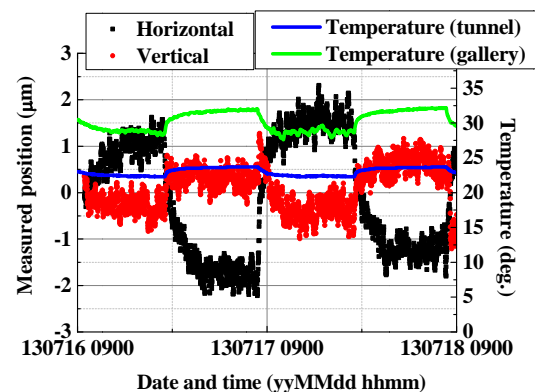


Figure 11: Long-term measurement accuracy during 2 days by a pulse signal generator.

5. まとめ

入射器では、SuperKEKB 計画へ向けて、大電荷量かつ低エミッタンスビームの安定入射に関する開発をおこなっている。電子ビームについては、ダンピングリングを用いないビーム輸送をおこなうため、機器の精密アライメント、高精度なビーム位置測定、および制御が重要となる。このため、ビーム位置測定精度 10 μm 以下を目標として、新たな BPM データ収集システムの開発を進めている。今回、新システムの候補として、LSPE の性能評価をおこなった。PF リング入射用 0.3 nC の電子ビームを用いた 3-BPM 測定の結果、水平および垂直方向ともに約 7 μm のビーム位置測定精度を達成し、目標値を十分満足することを確認した。また、1 バンチ目の BPM 信号の漏れ出しが 2 バンチ目のビーム位置計測に与える影響を測定した。さらに、長時間のチャンネル間利得変動が測定に与える影響も評価し、実運用上問題が無いことを確認した。今後は、並行して開発を進めている VME モジュール^[25]の性能評価と比較検討し、現システムからの置き換えを進める予定である。

謝辞

3-BPM 測定法を用いたビーム試験に協力して頂いた、I-Tech 社の Matjaz Znidarcic 氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Satoh et al., "FIRST SIMULTANEOUS TOP-UP OPERATION OF THREE DIFFERENT RINGS IN KEK INJECTOR LINAC", in Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan, pp.703-707 (2010).
- [2] K. Furukawa et al., "NEW EVENT-BASED CONTROL SYSTEM FOR SIMULTANEOUS TOP-UP OPERATION AT KEKB AND PF", in Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan, pp.765-767 (2009).
- [3] Y. Ohnishi et al., "Design and Performance of Optics for Multi-energy Injector Linac", in Proceedings of XXIV Linear Accelerator Conference, Victoria, British Columbia, Canada, Sep. 29-Oct. 3, pp.413-415 (2008).
- [4] N. Iida et al., "PULSE-TO-PULSE SWITCHING INJECTION TO THREE RINGS OF DIFFERENT ENERGIES FROM A SINGLE ELECTRON LINAC AT KEK", in Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, May 4-8, pp.2769-2771 (2009).
- [5] A. Enomoto et al., "Linac Upgrade in Intensity and Emittance for SuperKEKB", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.1819-1821 (2012).
- [6] F. Miyahara et al., "Development of L-Band Positron Capture Accelerating Structure with Kanthal-coated Collinear Load for Super KEKB", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.1933-1935 (2012).
- [7] L. Zang et al., "Design Optimization of Flux Concentrator for SuperKEKB", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.1473-1475 (2012).
- [8] H. Sugimoto et al., "Design Study on KEK Injector Linac Upgrade for High-current and Low-emittance Beams", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.1206-1208 (2012).
- [9] M. Yoshida et al., "SuperKEKB Injector Upgrade for High Charge and Low Emittance Electron Beam", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.1482-1484 (2012).
- [10] Takuya Natsui et al., "High Charge Low Emittance RF Gun for SuperKEKB", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.1533-1535 (2012).
- [11] X. Zhou et al., "Ytterbium Fiber Laser System of DAW RF Gun for SuperKEKB", in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, New Orleans, USA, May 20-25, pp.2648-2650 (2012).
- [12] Takuya Natsui, "Linac upgrade for SuperKEKB", in these proceedings.
- [13] Mitsuhiro Yoshida et al., "Temporal manipulation of low emittance and high charge electron beam for SuperKEKB injection", in these proceedings.
- [14] Xiangyu Zhou et al., "Yb hybrid laser system of DAW RF gun for SuperKEKB", in these proceedings.
- [15] Daisuke Satoh et al., "Development of new photocathode materials and its quantum efficiency improvement for high brightness electron gun", in these proceedings.
- [16] Hiroshi Kaji et al., "Injection control at SuperKEKB with Event Timing System", in these proceedings.
- [17] Mitsuo Akemoto et al., "Development of Flux Concentrator Modulator for SuperKEKB", in these proceedings.
- [18] K. Furukawa et al., "Beam Feedback Systems and BPM Read-Out System for the Two-Bunch Acceleration at the KEKB Linac", in Proceedings of the ICALEPCS2001, San Jose, November 2001, pp.266-268 (2001).
- [19] T. Suwada et al., "Nondestructive beam energy-spread monitor using multi-strip-line electrodes", Phys. Rev. ST Accel. Beams 6, 032801 (2003).
- [20] T. Suwada et al., "New energy-spread-feedback control system using nondestructive energy-spread monitors", Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 112802 (2005).
- [21] T. Suwada et al., "Stripline-type beam-position-monitor system for single-bunch electron/positron beams", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440, pp.307-319 (2000).
- [22] M. Satoh et al., "EPICS IOC OF WINDOWSXP-BASED OSCILLOSCOPE FOR FAST BPM DATA ACQUISITION SYSTEM", in Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan, pp.567-569 (2009).
- [23] T. Aoyama et al., "UPGRADE OF READOUT SYSTEM FOR BEAM POSITION MONITORS IN THE KEKB BEAM TRANSPORT LINE", in Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan, pp.495-497 (2009).
- [24] <http://www.i-tech.si/>.
- [25] Ryo Ichimiya et al., "DEVELOPMENT OF BEAM POSITION MONITOR READOUT SYSTEM FOR ELECTRON-POSITRON INJECTOR LINAC TOWARDS THE SUPERKEKB", in these proceedings.
- [26] Matjaz Znidarcic, private communication (2013).