

## SuperKEKB 入射器コミッショニングの現状 (IV)

### PRESENT STATUS OF SuperKEKB INJECTOR LINAC COMMISSIONING (IV)

佐藤政則<sup>#, A, B</sup>, 明本光生<sup>A, B</sup>, 荒川大<sup>A</sup>, 荒木田是夫<sup>A, B</sup>, 飯田直子<sup>A, B</sup>, 池田光男<sup>A</sup>, 岩瀬広<sup>B, C</sup>, 惠郷博文<sup>A, B</sup>, 榎本收志<sup>A</sup>, 榎本嘉範<sup>A, B</sup>, 大沢哲<sup>A, B</sup>, 大西幸喜<sup>A, B</sup>, 小川雄二郎<sup>A, B</sup>, 柿原和久<sup>A</sup>, 梶裕志<sup>A, B</sup>, 片桐広明<sup>A</sup>, 紙谷琢哉<sup>A, B</sup>, 菊池光男<sup>A, B</sup>, 小磯晴代<sup>A, B</sup>, Feng Qiu<sup>A, B</sup>, 佐武いつか<sup>A</sup>, 佐藤大輔<sup>A</sup>, 設楽哲夫<sup>D</sup>, 周翔宇<sup>A, B</sup>, 白川明広<sup>A</sup>, 末武聖明<sup>A</sup>, 杉村仁志<sup>A</sup>, 杉本寛<sup>A, B</sup>, 諏訪田剛<sup>A, B</sup>, 清宮裕史<sup>A</sup>, 田中窓香<sup>A</sup>, 多和田正文<sup>A, B</sup>, 張叡<sup>A</sup>, 峠暢一<sup>A, B</sup>, 中尾克巳<sup>A</sup>, 中島啓光<sup>A</sup>, 夏井拓也<sup>A, B</sup>, 西田麻耶<sup>A</sup>, 肥後寿泰<sup>A, B</sup>, 福田茂樹<sup>A</sup>, 船越義裕<sup>A, B</sup>, 古川和朗<sup>A, B</sup>, 本間博幸<sup>A</sup>, 松下英樹<sup>A</sup>, 松本修二<sup>A, B</sup>, 松本利広<sup>A, B</sup>, 三浦孝子<sup>A, B</sup>, 三川勝彦<sup>A</sup>, 道園真一郎<sup>A, B</sup>, 三増俊弘<sup>A, B</sup>, 宮原房史<sup>A, B</sup>, 森隆志<sup>A, B</sup>, 森田昭夫<sup>A, B</sup>, 矢野喜治<sup>A, B</sup>, 横山和枝<sup>A, B</sup>, 吉田光宏<sup>A, B</sup>

Masanori Satoh<sup>#, A, B</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A, B</sup>, Dai Arakawa<sup>A</sup>, Yoshio Arakida<sup>A, B</sup>, Naoko Iida<sup>A, B</sup>, Mitsuo Ikeda<sup>A</sup>, Hiroshi Iwase<sup>B, C</sup>, Hiroyasu Ego<sup>A, B</sup>, Atsushi Enomoto<sup>A</sup>, Yoshinori Enomoto<sup>A, B</sup>, Satoshi Ohsawa<sup>A, B</sup>, Yuki Yoshi Ohnishi<sup>A, B</sup>, Yujiro Ogawa<sup>A, B</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>A</sup>, Hiroshi Kaji<sup>A, B</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A</sup>, Takuya Kamitani<sup>A, B</sup>, Mitsuo Kikuchi<sup>A, B</sup>, Haruyo Koiso<sup>A, B</sup>, Feng Qiu<sup>A, B</sup>, Itsuka Satake<sup>A</sup>, Daisuke Satoh<sup>A</sup>, Tetsuo Shidara<sup>D</sup>, Xiangyu Zhou<sup>A, B</sup>, Akihiro Shirakawa<sup>A</sup>, Masaaki Suetake<sup>A</sup>, Hitoshi Sugimura<sup>A</sup>, Hiroshi Sugimoto<sup>A, B</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>A, B</sup>, Yuji Seimiya<sup>A</sup>, Madoka Tanaka<sup>A</sup>, Masafumi Tawada<sup>A, B</sup>, Rui Zhang<sup>A</sup>, Nobukazu Toge<sup>A, B</sup>, Katsumi Nakao<sup>A</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A</sup>, Takuya Natsui<sup>A, B</sup>, Maya Nishida<sup>A, B</sup>, Toshiyasu Higo<sup>A, B</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A</sup>, Yoshihiro Funakoshi<sup>A, B</sup>, Kazuro Furukawa<sup>A, B</sup>, Hiroyuki Honma<sup>A</sup>, Hideki Matsushita<sup>A</sup>, Shuji Matsumoto<sup>A, B</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A, B</sup>, Takako Miura<sup>A, B</sup>, Katsuhiko Mikawa<sup>A</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A, B</sup>, Toshihiro Mimashi<sup>A, B</sup>, Fusashi Miyahara<sup>A, B</sup>, Takashi Mori<sup>A, B</sup>, Akio Morita<sup>A, B</sup>, Yoshiharu Yano<sup>A, B</sup>, Kazue Yokoyama<sup>A, B</sup>, and Mitsuhiro Yoshida<sup>A, B</sup>

<sup>A</sup>) High Energy Accelerator Organization (KEK), Accelerator Laboratory

<sup>B</sup>) The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Department of Accelerator Science

<sup>C</sup>) KEK, Radiation Science Center

<sup>D</sup>) KEK, Research Administration Department

### Abstract

SuperKEKB Phase I beam commissioning was completed in last June. The injector linac has successfully delivered the electron and positron beams to the SuperKEKB main ring without any significant troubles. For the Phase I commissioning, we archived an enough beam quality from an ordinary thermionic electron gun. Moreover, the beam injection to SuperKEKB electron ring has been successfully carried out by using a low emittance photocathode rf electron gun. After the Phase I commissioning, the linac beam and subsystem developments are going on together with the daily beam injection to both light sources of PF and PF-AR. In this February, the full energy injection to PF-AR has been firstly succeeded via the newly constructed beam transport line. In addition, the readout systems for 100 strip line type beam position monitors are replaced by the newly developed ones with the precision of about 10  $\mu\text{m}$ . During this summer maintenance period, we will install the pulsed quadrupole and steering magnets toward the future simultaneous top up injection to five independent storage rings. The merger beam line between the positron damping ring and the injector linac will also be constructed. In this report, we report the operational results of Phase I beam commissioning. In addition, the commissioning plans of Phase II and Phase III are also described in detail.

### 1. はじめに

KEKB 加速器のピークルミノシティは当初設計値の 2 倍を上回り、2010 年 6 月、成功裏に終了した。その間、入射器は、異なるエネルギーおよび電荷量のビームを、3 つの蓄積リング(KEKB 電子(HER)・陽電子(LER)および PF)へ同時トップアップ入射することに成功した。これにより、KEKB および PF リングの蓄積電流値安定性

は、それぞれ、0.05%および 0.01%を達成し、物理実験の成果へ大きく貢献した[1]。

2016 年 6 月には 5 ヶ月間続いた SuperKEKB 加速器 Phase I コミッショニングが無事終了した。Phase I コミッショニングでは、リング側機器の基本的な動作確認および真空焼きだし運転に重点がおかれ、さらに Belle II 検出器のためのビームバックグラウンドスタディがおこなわれた。入射器においては、低エミッタンス RF 電子銃からの HER 入射に初めて成功し、10 日間あまり継続した入射をおこなうことができた[2][3]。その後、PF および PF-AR

<sup>#</sup> masanori.satoh@kek.jp

への日常的なビーム入射と並行して、SuperKEKB Phase II、Phase III コミッショニング運転に要求される機器開発並びにビーム開発をおこなっている。次節以降、SuperKEKB 入射器に求められているビーム性能およびそのコミッショニング状況について詳しく述べる。

## 2. 入射器コミッショニング

### 2.1 概要

Figure 1 に入射器の概略図を示す。入射器は、約 80 m のセクタと呼ばれる区画から構成され、約 100 m の A および B セクタと、約 500 m の C から 5 セクタと呼ばれる二つの直線部から構成されている。それらは、J-ARC と呼ばれる 180 度偏向部で接続されており、SuperKEKB 入射用の熱電子銃は A1 熱電子銃と呼ばれ、A セクタ最上流に設置されている。また、放射光リング入射用の熱電子銃は 3 セクタ最上流部に設置され、3T 熱電子銃と呼ばれている。J-ARC 部でのビームエネルギーは、KEKB 運転時の 1.7 GeV から 1.5 GeV に変更された。これにより、100 m 直線部である A セクタおよび B セクタにおけるクライストロン予備機を確保し、ビーム運転の可用

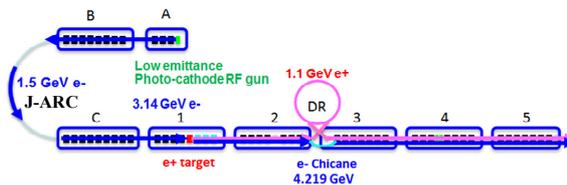


Figure 1: Schematic layout of the SuperKEKB injector linac. Two straight beam lines with the length of 100 m and 500 m, respectively, are connected by the 180 degree bending beam line (J-ARC).

性を高めている。KEKB および SuperKEKB ビーム運転における主要諸元を Table 1 に示した。

SuperKEKB では、ナノビーム方式と呼ばれる運転を実現するため、入射ビームには 20 mm·mrad 以下の低エミッタンスかつ低エネルギー広がりを持つビームが要求される。さらに、リングの蓄積ビーム寿命が 10 分以下と極端に短いため、大バンチ電荷量のビームが要求され、低エミッタンスビームの実現をさらに困難にしている。陽電子ビームについては、建設中である陽電子ダンピングリング(DR)を用いた運転をおこない、電子ビームについて

Table 1: Main Parameters of KEKB and SuperKEKB Injector Linac

Project	KEKB***		SuperKEKB*** (Phase I)		SuperKEKB**** (Phase II)		SuperKEKB**** (Phase III)	
	e-	e+	e-	e+	e-	e+	e-	e+
Beam								
Beam energy (GeV)	8	3.5	7	4	7	4	7	4
Stored current (A)	1.1	1.6	1	1	-	-	2.6	3.6
Beam lifetime (min.)	200	150	100	100	-	-	6	6
Bunch charge (nC)	1	1 (10*)	1	0.4 (8*)	1	0.5 (10*)	4	4 (10*)
Normalized vertical emittance (mm·mrad)	310	1400	300	1200	150	40	20	15
Normalized horizontal emittance (mm·mrad)			160	1000	150	200	40	100
Energy spread (%)	0.125	0.125	0.5	0.5	0.1	0.16	0.07	0.16
Bunch length (mm)	1.3	2.6	1.3	2.6	1.3	0.7	1.3	0.7
# of bunch	2		2		2			
Maximum beam repetition (Hz)	50		25		25 / 50			
Top up injection	3 rings (HER, LER, PF)		n/a		5 rings (HER, LER, DR, PF, PF-AR)			

\*: Primary electron beam for positron production.

\*\* : Results with the photocathode rf electron gun.

\*\*\* : Achieved values.

\*\*\*\* : Design values.

は、低エミッタンスRF電子銃およびビーム軌道の精密制御による低エミッタンス電子ビーム入射を実現する計画である。いずれのビームに関しても、加速管および四極電磁石の精密アライメントが要求されている。レーザートラッカー装置などを駆使して、0.3 mm (1 $\sigma$ )以下の機器アライメントを目標としている。それらに加えて、PF および PF-AR という2つの放射光リングへのトップアップ運転も早期に実現すべき課題であり、最終的には HER、LER、およびDRを含めた5リング同時トップアップ入射運転が不可欠となる。そのために必要である高度なタイミング制御システムや安全系システムの構築も並行しておこなっている。

## 2.2 Phase I コミッショニング

Phase I コミッショニングは、2016年1月25日から6月28日朝までおこなわれた。主な目的は、主リングの真空焼きだし、新規導入機器の動作試験、および低エミッタンスビーム実現のための主リング光学調整スタディなどである。Phase Iでの蓄積電流値は、LER および HER について、それぞれ、1010 mA および 870 mA にまで到達した。

Phase Iにおいては、LER および HER 入射ともに、A1熱電子銃を用いて開始した。ビーム輸送路(BT)終端では、電子ビーム0.7 nC、陽電子ビーム0.4 nC程度を導くことができた。また、ストリークカメラによるバンチ長測定をおこない、HER 入射用1 nCビームについては8 ps (FWHM)であることを確認した。また、LER 入射用の陽電子ビームを生成するための10 nC電子ビームについては、15 ps (FWHM)であることを確認した。これらの測定結果より、入射器ビームの品質は KEKB 運転時の水準を再現できていたことがわかった。RF電子銃を用いたHER入射にも初めて成功し、バンチ電荷量安定度は約4%であり、熱電子銃の約2%に匹敵するものであった。

## 2.3 入射器単独コミッショニング

2016年6月28日のPhase Iコミッショニング終了後、数日間の入射器単独ビームスタディ、夏期保守期間を経て、10月から入射器の運転を再開した。PFリングへのビーム入射と並行して、入射器単独でのビームコミッショニングを継続しておこなった。主に、低エミッタンスRF電子銃[4-8]関連のスタディおよびその他の開発を進めてきた[9-11]。また、入射器に約100台設置されている非破壊型ビーム位置モニタのデータ収集系は、新規開発のものに置き換えが完了した。これにより、位置測定精度が50  $\mu$ m から10  $\mu$ m以下に改善され[12]、ビーム軌道応答測定に必要な走査範囲の縮小によるスタディ時間の効率化を図ることができた。

2017年2月には、放射光リングであるPF-ARの新規BTを用いた6.5 GeVフルエネルギー入射のコミッショニングに成功した[13]。従来は、3T熱電子銃を用いた3 GeV電子ビームを入射していたが、トップアップ運転を想定した6.5 GeV電子ビームを入射するため、A1熱電子銃を用いた運転に移行した。その後、3月1日の放射線施設検査にも無事合格し、本運転形態によるユーザー実験へ向けた本格的な準備が始まった。同時期に、PFリングへの入射運転に関しても、従来の3T熱電子銃を用いた運転からA1熱電子からの入射に移行すべく

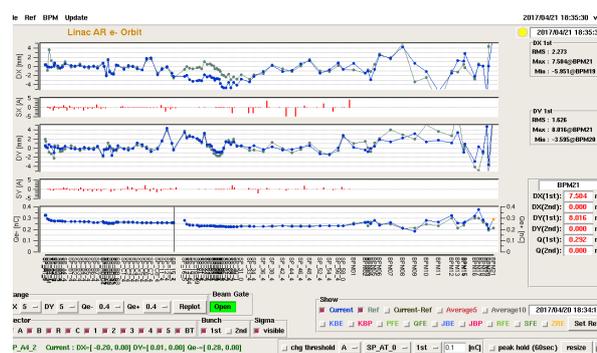


Figure 2: Typical beam orbit for PF-AR injection by using A1 thermionic electron gun. Top and middle lines indicate the horizontal and vertical beam orbits in mm units. Bottom line is the bunched beam charge in nC units.

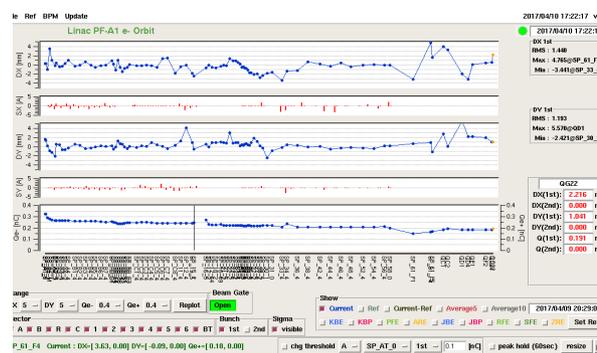


Figure 3: Typical beam orbit for PF ring injection by using A1 thermionic electron gun. Top and middle lines indicate the horizontal and vertical beam orbits in mm units. Bottom line is the bunched beam charge in nC units.

ビームスタディを開始し、2017年4月期の運転から本格的な運用を開始した。Figure 2に、A1熱電子銃からPF-AR入射時の入射器およびBTにおけるビーム軌道、電荷量の例を示す。また、Figure 3に、PF入射時の同様な例を示した。PF-AR入射ビームについては、入射器全体に亘ってビーム加速をおこなっているが、PF入射ビームについては、入射器終端でのビームエネルギーが2.5 GeVになるよう、下流の3セクタ以降においてはビームを減速している。このようなビーム入射方式を用いて、従来の3T熱電子銃使用時と同程度のビーム入射率および入射効率を実現できている。本運転形態の確立は、今後計画しているSuperKEKB HER、LER、DR、PF、およびPF-ARの5リング同時トップアップ入射運転に向けた大きなマイルストーンとなった。

## 2.4 Phase II および Phase III コミッショニングに向けて

入射器では、2017年5月15日の運転休止後、約5ヶ月間の保守およびビームライン増強工事が進行中である。今回のビームライン工事では、DRとの合流部ラインの構築および主に3セクタ下流部以降におけるパルス二極・四極電磁石設置作業が大きな比重を占めている。既設のDC電磁石を撤去し、新規開発された64台のパルス電磁石およびセラミックダクトを設置する作業は、6月

中旬までに完了した。今後、ケーブル配線、インタロック動作試験、および制御用ソフトウェア試験をおこなう予定である。10月10日の入射器立上げに先立ち、9月中旬にはパルス電磁石の総合動作試験ならびに安定度の測定



Figure 4: Photograph of the existing DC quadrupole triplet.



Figure 5: Photograph of the newly installed pulsed steering and quadrupole magnets.



Figure 6: Photograph of the pulsed steering and quadrupole magnet power supply and control system. The control system is based on the PXI and CompactRIO buses. The control software comprises NI LabVIEW and EPICS frameworks.

をおこなう予定である。現在のところ、制御用ソフトウェアの開発は順調に進められている。

Figure 4に、従来設置されていた四極電磁石の写真を示した。これらは、Figure 5の写真にあるとおり、パルス電磁石に置き換えられた。垂直および水平方向パルスステアリング電磁石の両端に、収束および発散型のパルス四極電磁石が設置される構成となっている。これらのパルス電磁石が設置されている架台についても新規製作をおこなった。将来、電動モータを追加設置することにより、遠隔操作可能なムーバー架台として動作させることが可能である。入射器のビームラインは、温度変化に起因する床変動により、長期的にはmmオーダーの変位が観測されており、低エミッタンスビームを実現するためには、動的ムーバー架台は強力なツールになると考えられる。

Figure 6に、入射器クライストロンギャラリー部に設置されたパルス電磁石電源および制御システムの写真を示す。パルス電磁石制御システムは、ハードウェアとしてはPXI および CompactRIO を採用し、ソフトウェアとしてはWindows 8.1 を基盤としたNI LabView および EPICS を組み合わせたシステム構成を採用した。従来の入射器制御システムは、VxWorks を基盤としたVME 計算機やPLC などを中心として構築してきたため、新たなバスやソフトウェアフレームワークを利用したシステム構築を経験することにより、新たな専門技術を蓄積することができ、大きな収穫となった。

2017年12月には、Phase II コミッショニングに先立ち、DR 単独のコミッショニングが計画されている。DR 自体が新規に建設された施設であるため、多数の開発、確認事項がある。コミッショニング初期から重要になる、ビーム入射のためのタイミングシステム[14]やDRを含めたLER入射のバケット選択システムなどの開発に力を注いでおり、10月中旬には機器単体の総合試験をおこなう予定である。また、DR安全系システムの新設やそれに関連した入射器安全系システムの改修作業も急ピッチで進んでいる。

Phase III コミッショニング以降では、大バンチ電荷量、低エミッタンス、かつ低エネルギー広がりを持つ高品質ビームを安定供給することが最重要課題である。そのため、Phase II コミッショニング終了までの間に、低エミッタンス保存に関連するビームスタディに注力したい。さらに、5リング同時トップアップ入射に向けて、DC 電磁石部の共通運転パラメタの確立も重要課題である。入射器スタディの時間を比較的十分に確保できるDR単独コミッショニング前に、運転パラメタの確立を目指したい。

### 3. まとめ

2016年6月には5か月間続いたSuperKEKB Phase I コミッショニングが無事終了し、入射器の成果としては、低エミッタンスRF電子銃からのHER入射に初めて成功したことが挙げられる。その後、各種のビームスタディおよびPFリングへの入射運転を継続してきた。それに加えて、2017年2月にはPF-AR直接入射路コミッショニングをおこない、A1熱電子銃からの6.5 GeVフルエネルギービーム入射およびトップアップ入射スタディに成功した。2017年4月以降は、SuperKEKB Phase II および Phase III コミッショニングに向けた低エミッタンスRF電子銃のスタディを進めるとともに、パルス二極・四極電磁石電源の

試験を進めてきた。これらのパルス電磁石電源は、電磁石本体およびセラミックダクトとともに本夏期保守期間中にインストールをおこなう。2017年10月10日より入射器の運転が再開されるが、PFおよびPF-ARへの入射運転と並行して、パルス電磁石を用いた安定なビーム運転の確立、低エミッタンスビーム生成およびエミッタンス増大の抑制、DRへの入出射タイミングシステム、などの項目を中心にコミッショニングを進める予定である。最終目標である、HERおよびLERへの大バンチ電荷量かつ低エミッタンスビームの入射や、放射光リングを含めた5リング同時トップアップ入射へ向けて、一つずつ問題点を解消していきたい。それと同時に、老朽化している機器の更新や保守方法などについても、具体的かつ詳細な戦略を練っていきたい。

## 参考文献

- [1] Mitsuo Akemoto *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A002.
- [2] T. Kamitani *et al.*, “SuperKEKB Phase1 (Injector+Ring) Status Report”, in Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10 2016, Aomori, Japan, pp.4-8 (2016).
- [3] Y. Funakoshi *et al.*, “Phase 1 beam commissioning of SuperKEKB”, in Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10 2016, Aomori, Japan, pp.24-28 (2016).
- [4] N. Liu *et al.*, “The consideration of RF phase reference distribution system for the injector linac of SuperKEKB”, these proceedings, WEP065.
- [5] T. Natsui *et al.*, “RF gun development for SuperKEKB”, these proceedings, TUP004.
- [6] D. Satoh *et al.*, “Improvement of photoemission properties of iridium cerium compound for SuperKEKB injector linac”, these proceedings, WEP106.
- [7] Xi. Zhou *et al.*, “Yb fiber and Nd:YAG hybrid laser system of RF gun for SuperKEKB's phase-II commissioning”, these proceedings, WEP116.
- [8] R. Zhang *et al.*, “Study on stable and high output energy laser system for RF-gun at SuperKEKB injector”, these proceedings, WEP117.
- [9] T. Natsui *et al.*, “Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac”, in these proceedings, FSP004.
- [10] M. Baba *et al.*, “Operation statistics and maintenance activity of RF system in KEK electron-positron linac”, these proceedings, WEP056.
- [11] M. Kawamura *et al.*, “Present status of inverter power supplies for modulators in KEK electron-positron linac (2)”, these proceedings, TUP060.
- [12] 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 Proceedings of IBIC2014, Monterey, USA, September 14–18, pp.637-641 (2014).
- [13] N. Higashi *et al.*, “Construction and commissioning of direct beam transport line dedicated for PF-AR”, in these proceedings, THOL10.
- [14] H. Sugimura *et al.*, “Status of event timing system at damping ring SuperKEKB”, in these proceedings, TUP094.