

# SuperKEKB フェーズ1における入射器とリングの現状 SUPERKEKB PHASE1 (INJECTOR+RING) STATUS REPORT

紙谷 琢哉<sup>\*A)</sup>、赤井 和憲<sup>A)</sup>、秋山 篤美<sup>A)</sup>、明本 光生<sup>A)</sup>、安達 利一<sup>A)</sup>、阿部 哲郎<sup>A)</sup>、荒川 大<sup>A)</sup>、荒木田 是夫<sup>A)</sup>、有永 三洋<sup>A)</sup>、有本 靖<sup>A)</sup>、飯田 直子<sup>A)</sup>、飯沼 裕美<sup>A)</sup>、池田 仁美<sup>A)</sup>、池田 光男<sup>A)</sup>、石井 仁<sup>A)</sup>、石橋 拓弥<sup>A)</sup>、岩崎 昌子<sup>A)</sup>、岩瀬 広<sup>A)</sup>、植木 竜一<sup>A)</sup>、上原 貞治<sup>A)</sup>、宇野 彰二<sup>A)</sup>、江川 一美<sup>A)</sup>、榎本 收志<sup>A)</sup>、榎本 嘉範<sup>A)</sup>、Dima El Khechen<sup>B)</sup>、海老原 清一<sup>A)</sup>、生出 勝宣<sup>A)</sup>、大内 徳人<sup>A)</sup>、大木 俊征<sup>A)</sup>、大沢 哲<sup>A)</sup>、大澤 康伸<sup>A)</sup>、大西 幸喜<sup>A)</sup>、大見 和史<sup>A)</sup>、小川 雄二郎<sup>A)</sup>、小田切 淳一<sup>A)</sup>、小野 正明<sup>A)</sup>、柿原 和久<sup>A)</sup>、影山 達也<sup>A)</sup>、風間 慎吾<sup>C)</sup>、梶 裕志<sup>A)</sup>、片桐 広明<sup>A)</sup>、加藤 茂樹<sup>A)</sup>、金澤 健一<sup>A)</sup>、可部 農志<sup>A)</sup>、川村 真人<sup>A)</sup>、川本 崇<sup>A)</sup>、菊池 光男<sup>A)</sup>、工藤 喜久男<sup>A)</sup>、倉品 美帆<sup>A)</sup>、小磯 晴代<sup>A)</sup>、小島 裕二<sup>A)</sup>、小玉 恒太<sup>A)</sup>、小林 鉄也<sup>A)</sup>、坂井 浩<sup>A)</sup>、坂本 裕<sup>A)</sup>、佐々木 信哉<sup>A)</sup>、佐武 いつか<sup>A)</sup>、佐藤 大輔<sup>A)</sup>、佐藤 政則<sup>A)</sup>、佐藤 政行<sup>A)</sup>、佐波 俊哉<sup>A)</sup>、宗 占国<sup>A)</sup>、設楽 哲夫<sup>A)</sup>、柴田 恭<sup>A)</sup>、清水 洋孝<sup>A)</sup>、周 翔宇<sup>A)</sup>、周 徳民<sup>A)</sup>、白井 満<sup>A)</sup>、白川 明広<sup>A)</sup>、末武 聖明<sup>A)</sup>、末次 祐介<sup>A)</sup>、菅原 龍平<sup>A)</sup>、杉本 寛<sup>A)</sup>、諏訪 田剛<sup>A)</sup>、清宮 裕史<sup>A)</sup>、鷹崎 誠治<sup>A)</sup>、竹内 保直<sup>A)</sup>、竹中 たてる<sup>A)</sup>、田中 窓香<sup>A)</sup>、多和田 正文<sup>A)</sup>、張 叡<sup>A)</sup>、邱 丰<sup>A)</sup>、土屋 清澄<sup>A)</sup>、照井 真司<sup>A)</sup>、峠 暢一<sup>A)</sup>、飛山 真理<sup>A)</sup>、内藤 孝<sup>A)</sup>、仲井 浩孝<sup>A)</sup>、中尾 克巳<sup>A)</sup>、中島 啓光<sup>A)</sup>、中西 功太<sup>A)</sup>、中村 衆<sup>A)</sup>、中村 達郎<sup>A)</sup>、中山 浩幸<sup>A)</sup>、夏井 拓也<sup>A)</sup>、西脇 みちる<sup>A)</sup>、二宮 重史<sup>A)</sup>、野島 健大<sup>A)</sup>、原 和文<sup>A)</sup>、肥後 寿泰<sup>A)</sup>、久松 広美<sup>A)</sup>、福田 茂樹<sup>A)</sup>、福間 均<sup>A)</sup>、船越 義裕<sup>A)</sup>、舟橋 義聖<sup>A)</sup>、フラナガン ジョン<sup>A)</sup>、古川 和朗<sup>A)</sup>、古屋 貴章<sup>A)</sup>、細山 謙二<sup>A)</sup>、本間 輝也<sup>A)</sup>、本間 博幸<sup>A)</sup>、増澤 美佳<sup>A)</sup>、松下 英樹<sup>A)</sup>、松本 修二<sup>A)</sup>、松本 利広<sup>A)</sup>、丸塚 勝美<sup>A)</sup>、三浦 孝子<sup>A)</sup>、三川 勝彦<sup>A)</sup>、道園 真一郎<sup>A)</sup>、光延 信二<sup>A)</sup>、三増 俊弘<sup>A)</sup>、宮原 房史<sup>A)</sup>、森 健児<sup>A)</sup>、森 隆志<sup>A)</sup>、森田 昭夫<sup>A)</sup>、森田 欣之<sup>A)</sup>、矢野 喜治<sup>A)</sup>、山岡 広<sup>A)</sup>、横山 和枝<sup>A)</sup>、吉田 正人<sup>A)</sup>、吉田 光宏<sup>A)</sup>、吉野 一男<sup>A)</sup>、吉本 伸一<sup>A)</sup>、渡邊 謙<sup>A)</sup>、王 旭東<sup>A)</sup>

Takuya Kamitani<sup>\*A)</sup>、Kazunori Akai<sup>A)</sup>、Atsuyoshi Akiyama<sup>A)</sup>、Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>、Toshikazu Adachi<sup>A)</sup>、Tetsuo Abe<sup>A)</sup>、Dai Arakawa<sup>A)</sup>、Yoshio Arakida<sup>A)</sup>、Mitsuhiro Arinaga<sup>A)</sup>、Yasushi Arimoto<sup>A)</sup>、Naoko Iida<sup>A)</sup>、Hiromi Inuma<sup>A)</sup>、Hitomi Ikeda<sup>A)</sup>、Mitsuo Ikeda<sup>A)</sup>、Hitoshi Ishii<sup>A)</sup>、Takuya Ishibashi<sup>A)</sup>、Masako Iwasaki<sup>A)</sup>、Hiroshi Iwase<sup>A)</sup>、Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>、Sadaharu Uehara<sup>A)</sup>、Shoji Uno<sup>A)</sup>、Kazumi Egawa<sup>A)</sup>、Atsushi Enomoto<sup>A)</sup>、Yoshinori Enomoto<sup>A)</sup>、Dima El Khechen<sup>B)</sup>、Kiyokazu Ebihara<sup>A)</sup>、Katsunobu Oide<sup>A)</sup>、Norihito Ohuchi<sup>A)</sup>、Toshiyuki Oki<sup>A)</sup>、Satoshi Ohsawa<sup>A)</sup>、Yasunobu Ohsawa<sup>A)</sup>、Yukiyoshi Ohnishi<sup>A)</sup>、Kazuhiro Ohmi<sup>A)</sup>、Yujiro Ogawa<sup>A)</sup>、Jun-ichi Odagiri<sup>A)</sup>、Masaaki Ono<sup>A)</sup>、Kazuhiro Kakihara<sup>A)</sup>、Tatsuya Kageyama<sup>A)</sup>、Shingo Kazama<sup>C)</sup>、Hiroshi Kaji<sup>A)</sup>、Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>、Shigeki Kato<sup>A)</sup>、Ken-ichi Kanazawa<sup>A)</sup>、Atsushi Kabe<sup>A)</sup>、Masato Kawamura<sup>A)</sup>、Takashi Kawamoto<sup>A)</sup>、Mitsuo Kikuchi<sup>A)</sup>、Kikuo Kudo<sup>A)</sup>、Miho Kurashina<sup>A)</sup>、Haruyo Koiso<sup>A)</sup>、Yuuji Kojima<sup>A)</sup>、Kota Kodama<sup>A)</sup>、Tetsuya Kobayashi<sup>A)</sup>、Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>、Yutaka Sakamoto<sup>A)</sup>、Shinya Sasaki<sup>A)</sup>、Itsuka Satake<sup>A)</sup>、Daisuke Satoh<sup>A)</sup>、Masanori Satoh<sup>A)</sup>、Masayuki Sato<sup>A)</sup>、Toshiya Sanami<sup>A)</sup>、Zong Zhanguo<sup>A)</sup>、Tetsuo Shidara<sup>A)</sup>、Kyo Shibata<sup>A)</sup>、Hirotaka Shimizu<sup>A)</sup>、Xiangyu Zhou<sup>A)</sup>、Demin Zhou<sup>A)</sup>、Mitsuru Shirai<sup>A)</sup>、Akihiro Shirakawa<sup>A)</sup>、Masaaki Suetake<sup>A)</sup>、Yusuke Suetsugu<sup>A)</sup>、Ryuhei Sugahara<sup>A)</sup>、Hiroshi Sugimoto<sup>A)</sup>、Tsuyoshi Suwada<sup>A)</sup>、Yuji Seimiya<sup>A)</sup>、Seiji Takasaki<sup>A)</sup>、Yasunao Takeuchi<sup>A)</sup>、Tateru Takenaka<sup>A)</sup>、Madoka Tanaka<sup>A)</sup>、Masafumi Tawada<sup>A)</sup>、Rui Zhang<sup>A)</sup>、Feng Qiu<sup>A)</sup>、Kiyosumi Tsuchiya<sup>A)</sup>、Shinji Terui<sup>A)</sup>、Nobukazu Toge<sup>A)</sup>、Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>、Takashi Naito<sup>A)</sup>、Hirotaka Nakai<sup>A)</sup>、Katsumi Nakao<sup>A)</sup>、Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>、Kota Nakanishi<sup>A)</sup>、Shu Nakamura<sup>A)</sup>、Tatsuro Nakamura<sup>A)</sup>、Hiroyuki Nakayama<sup>A)</sup>、Takuya Natsui<sup>A)</sup>、Michiru Nishiwaki<sup>A)</sup>、Shigeshi Ninomiya<sup>A)</sup>、Kenta Nojima<sup>A)</sup>、Kazufumi Hara<sup>A)</sup>、Toshiyasu Higo<sup>A)</sup>、Hiromi Hisamatsu<sup>A)</sup>、Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>、Hitoshi Fukuma<sup>A)</sup>、Yoshihiro Funakoshi<sup>A)</sup>、Yoshisato Funahashi<sup>A)</sup>、John W. Flanagan<sup>A)</sup>、Kazuro Furukawa<sup>A)</sup>、Takaaki Furuya<sup>A)</sup>、Kenji Hosoyama<sup>A)</sup>、Teruya Honma<sup>A)</sup>、Hiroyuki Honma<sup>A)</sup>、Mika Masuzawa<sup>A)</sup>、Hideki Matsushita<sup>A)</sup>、Shuji Matsumoto<sup>A)</sup>、Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>、Katsumi Marutsuka<sup>A)</sup>、Takako Miura<sup>A)</sup>、Katsuhiko Mikawa<sup>A)</sup>、Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>、Shinji Mitsunobu<sup>A)</sup>、Toshihiro Mimashi<sup>A)</sup>、Fusashi Miyahara<sup>A)</sup>、Kenji Mori<sup>A)</sup>、Takashi Mori<sup>A)</sup>、Akio Morita<sup>A)</sup>、Yoshiyuki Morita<sup>A)</sup>、Yoshiharu Yano<sup>A)</sup>、Hiroshi Yamaoka<sup>A)</sup>、Kazue Yokoyama<sup>A)</sup>、Masato Yoshida<sup>A)</sup>、Mitsuhiro Yoshida<sup>A)</sup>、Kazuo Yoshino<sup>A)</sup>、Shin-ichi Yoshimoto<sup>A)</sup>、Ken Watanabe<sup>A)</sup>、Xudong Wang<sup>A)</sup>、<sup>A)</sup>KEK/SOKENDAI, <sup>B)</sup>LAL, Orsay, France, <sup>C)</sup>University of Zurich, Zurich, Switzerland

## Abstract

This paper reports on the progress in the Phase1 operation of SuperKEKB. In the former part of the paper, we describe the three major achievements in the storage ring commissioning. (1) Check of apparatus and softwares have been performed during the tuning of the injection, the circulation and the accumulation of the electron and the positron beams. (2) The scrubbing of the vacuum chambers by synchrotron radiation have resulted in significant improvement of the vacuum pressure level. (3) Beam optics tuning to achieve low emittance stored beam has been successful except for some inconsistency in beam size measurement. In the latter part of the paper, we describe the following three topics in the injector linac commissioning. (1) We have established stable electron beam injections from the thermionic gun and from the RF gun. The RF gun is newly introduced in SuperKEKB and the first beam injection was successful. (2) We have established stable positron beam injections from the positron source using a flux concentrator and large aperture S-band accelerating structures. (3) Test operation of the new components (pulse magnets and its pulse drivers, high precision readout system of the beam position monitors) for the Phase-2 have been performed.

## 1. はじめに

KEKでは2010年まで約10年間にわたり運転を行ってきたBファクトリー加速器(KEKB)のルミノシティーを40倍向上させるSuperKEKB加速器のための増強改造を進めてきた。そしていよいよ2016年2月よりPhase1と呼ばれる状態(本格的なビーム衝突運転に入る前の試験運転段階)での運転を開始し同年6月末まで行われた。この期間には電子陽電子衝突実験のためのBelle II検出器、衝突点でのビーム収束のための超伝導マグネットによる最終収束系及び陽電子ダンピングリングはまだ設置されていない。一方2017年秋からのPhase2運転ではこれらが設置され、本格的なビーム衝突運転が開始される予定である。

Phase1運転では多くの重要な成果が得られたが、本論文の前半では蓄積リングコミッショニングの3つの主要な成果にポイントをしばって紹介する。(1)ビーム入射、蓄積が安定して行えるようにビーム調整を行い、そのビームを用いて各種機器の立ち上げ、初期調整や較正、また各種運転用ソフトウェアの整備などを行うことができた。(2)2つのリングに設置された多数の新しい真空チェンバーについて、ビームによる真空焼き出しを進めて圧力を低下させておくことができた。(3)高いルミノシティーでの運転に必須である、蓄積ビームの低エミッタンス状態を実現するようなビームオプティクス調整ができた。なお、より詳細な状況に興味のある方は船越氏の報告[1]を参照していただきたい。

また本論文の後半では入射Linacのコミッショニングについての以下の3つの主要なテーマについて紹介する:(1)熱電子銃及びRF電子銃からの電子ビーム入射の状況、(2)陽電子ビーム入射の状況、(3)Phase2運転に向けた新規コンポーネント(パルスマグネット、高精度ビーム位置モニター読み出し系)の試験状況。なお入射Linacコミッショニングの詳細については佐藤氏の報告[2]を参照していただきたい。

## 2. リングコミッショニングの要点

### 2.1 ビーム入射、蓄積調整と機器類の立ち上げ

2016年1月よりまず入射Linacの立ち上げとビーム調整が行われ、そしてビームトランスポートライン終端までのビーム調整に引き続いて、2月8日からはLERリングへの陽電子入射が始まり、さらに2月22日からはHERリングへの電子入射が始まった。それぞれについて入射セブタム、キッカー系の調整が行われてリングへビームが導かれ、さらにリング内での軌道調整を進めてビームが周回することが確認された。これにより全周にわたる電磁石系と真空チェンバー系に大きな問題は無いことが示された。そして常伝導ARES空洞及び超伝導空洞のRF加速を立ち上げてビームが蓄積できるようになり、RF系も基本的な問題が無いことが確認され、その後は蓄積ビーム電流を増やすために加速電圧も順次増加させていった。蓄積ビームを安全に捨てるためのビームアポート系の調整が行われ、ビームの蓄積電流をバンチごとに測定する電流モニター、ビーム

チューンの測定系やビーム位置モニターの調整が進められた。また入射Linacからリングへの入射タイミング同期系や入射バケット選択の仕組みの調整や、ビームの振動を抑えるためのビームキッカーを含むFeedback系の調整が行われた。またビーム運転を行うための制御系や運転用ソフトウェア、各種ハードウェアの状態監視、制御のソフトウェアなどについても整備、調整が進められた。このようにしてPhase1運転期間中に各種の機器がビーム運転を行うのに問題無い状態が確立された、これが第1の成果である。

### 2.2 SuperKEKBリングの真空焼き出し

陽電子蓄積リング(LER)ではビームからの放射光により真空チェンバー壁面から放出される電子が陽電子ビーム軌道に雲状に蓄積することによるビームサイズの膨張やビーム不安定性を引き起こすことが懸念されている。SuperKEKBではこれに向けて、真空チェンバーに側室を設けてそこで放射光を受けることで放出電子が陽電子ビーム軌道まで行かないように工夫したり、放出電子を再吸収するための電極を付いたり、内側表面にTiNコーティングすることなどの対策を行い、LERの真空チェンバーを全面的に更新した。このため、真空チェンバーの大多数が温存されたHERに比べて、LERは初期到達圧力が高いことが予想された。

Phase2以降の運転ではBelle II検出器が設置されて電子陽電子衝突実験が始まるが、その際リング内の圧力が高いとビームガス衝突によるバックグラウンドが検出器に悪い影響を及ぼすことになる。それを避けるためにPhase1運転期間のうちに特にLERに重点を置いて、ビームからの放射光により真空チェンバー壁面からガス放出をうながして圧力を低下させる、いわゆる”真空焼き出し”を行うことが重要な課題であった[3]。これの目安としてLERについては蓄積電流を運転時間で積分した量(Beam Dose)で750[A.h]を超えれば、真空焼き出しが十分に行われたと見なせるという目標が設定された。これを達成するためには蓄積ビーム電流も着実に増やしていくことが必要であり、今期のPhase1ではLERの蓄積電流値は1.0[A]まで達することを目標とした。図1にPhase1期間における蓄積ビーム電流

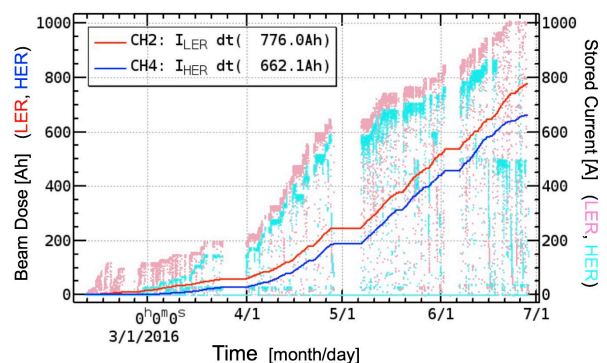


Figure 1: History of beam doses and stored currents.

(桃色: LER、水色: HER)と積分電流量(Beam Dose)(赤色: LER、青色: HER)の経緯を示すが、LERの最大蓄積電流は1.01[A]、積分電流量は776[A.h]に到達

\*takuya.kamitani@kek.jp

し目標を達成した。また HER についてもそれぞれ 0.87 [A], 662 [A.h] まで到達している。真空焼き出しが進む

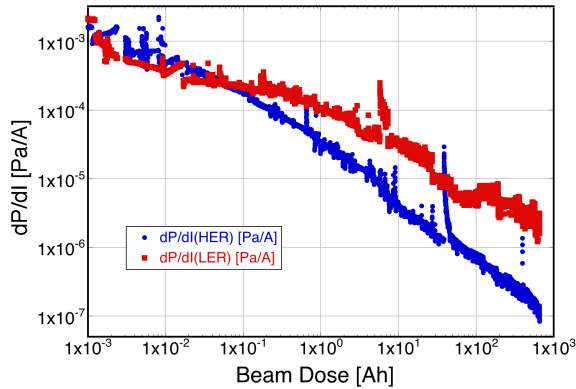


Figure 2: Reduction of pressure upon beam dose.

につれて真空チェンバー内の圧力が低下していることを図2に示す。横軸は積分電流量 (Beam Dose) で、2本のプロットは LER(赤色) と HER(青色) それぞれのビーム電流 1A 当たりの圧力上昇量であり、これが右肩下がりであることはあるビーム電流値での圧力が低くなっていることを示している。LER については焼きだしによりこれが3桁程度向上しているし、HER については KEKB 時代のチェンバー表面の良い状態を維持しているためさらに1桁良い値を達成している。このように Phase1 運転の課題の一つであるリングの真空焼きだしについて当初の目標をクリアすることができた。

### 2.3 低エミッタンス化オプティクス調整

Phase1 では衝突点付近の超伝導マグネットによる最終集束系及び Belle II 検出器はまだ設置されていないためにビームオプティクス上の制約が緩いので、その期間に衝突点付近以外の部分について Phase2 以降の衝突状態を目指して想定している低エミッタンス (垂直エミッタンス値が 10 pm 以下) を実現するために十分なビームオプティクス調整をしておくことが Phase1 の第3の課題であった [4]。調整開始当初の到達エミッタンスはかなり大きかったが、その原因はリング全周にわたるベータ関数やディスパージョン値が設計値からずれていること及び XY-カップリングが十分に小さくなっていないために水平エミッタンスからの回り込みがあることなどに起因している。

ディスパージョン値などの設計オプティクスとのずれに関しては、六極電磁石に skew-Q 成分を作る補助コイルを巻いたものを運用すること及び、ビームを使った測定によりビーム位置モニター (BPM) の原点較正を進めることによりビーム軌道が正確に四極、六極電磁石の中心を通せるようにしたことにより十分に改善された。

XY-カップリングについては通常のオプティクス補正に使えるパラメータの調整範囲には収まらないカップリングがあることが分かったが、ビームダンプ部に使われているランバートソン型マグネットからの漏れ磁場が影響していることが判明した。そこで最も影響の大きい skew-Q 成分を打ち消すようなフェライトマグ

ネットをこの近くに取り付けた結果、XY-カップリングを十分小さくすることができた。

これらのオプティクス調整の結果 LER の垂直エミッタンス値は図3のように改善して 10 pm 以下となり、ほぼ目標値に到達しているように思われる。その一方で HER についてはビームのオプティクス特性の測定値から推定したエミッタンス値はほぼ目標値に近いように見えるが、X線モニターで実測されているビームサイズからの推定値は約 200 pm と一桁大きな値となり一致しないことが謎となっており、現在その原因については調査継続中である。

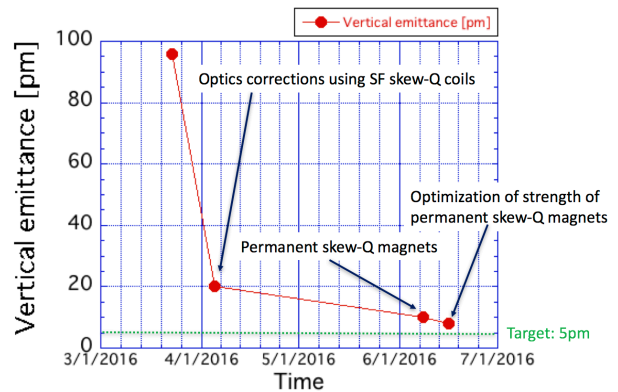


Figure 3: Reduction of LER vertical emittance.

## 3. 入射 LINAC コミッショニングの要点

入射 Linac では SuperKEKB の運転開始に先立って、数年間にわたって RF 電子銃の設置、熱電子銃と RF バンチ圧縮セクションからなる前段入射部の移設とこれらの2階建て化、陽電子捕獲セクションの改造、ビームアクセプタンスを拡げるための Q マグネット収束系の増強とそれに伴う加速ユニットのレイアウト変更などの改造を進め、加速ユニット架台及びそれに搭載されている加速管などのコンポーネントのアラインメント調整によりビームラインを直線的に並べる整備を行い、各種機器の試運転やビームスタディーなどが進められてきた [5, 6]。そして今年 2016 年 2 月よりいよいよ SuperKEKB 加速器へのビーム入射が開始された [2]。以下の節ではまず Phase1 期間の電子ビーム及び陽電子ビームの入射の状況について述べ、さらに次期 Phase-2 運転に向けた機器の試験の状況について紹介する。

### 3.1 電子ビーム入射

SuperKEKB では 2 台の電子源 (前段入射部) を併用する。1つは電子ビームの最終仕様値として要求されている低エミッタンス (規格化値で 50, 20  $\mu\text{m}$ : 水平、垂直方向) のビームを生成するための光カソード RF 電子銃 [7] と 2m 長加速管 1 本及び磁氣的バンチ長圧縮のためのシケイン部からなる前段入射部であり、もう1つは陽電子生成用の大電荷電子ビームを生成するための熱電子銃と 2 種類のサブハーモニックバンチャー、プレバンチャー空洞、バンチャー空洞からなる RF 的バンチ長圧縮部及び 2m 長加速管 2 本から構成される前段入射部である。なお熱電子銃の入射部は KEKB の時に用いら

れたものを移設したものである。これら2つの前段入射部は2階建て構造（RF電子銃が1階で熱電子銃が2階）で配置されておりビーム合流部の偏向電磁石の磁場を変えることにより切り替えることができる。RF電子銃はカソード材料に量子効率が高く寿命の長いIr<sub>5</sub>Ceを用い、加速部分は擬似進行波型サイドカップル空洞となっている。これに照射するレーザーシステムにはYbドープファイバーレーザー発振器とYb/YAGマルチパス増幅器を用いて、25 ps長の電子ビームのバンチを生成しこれをシケイン部で10 ps長まで圧縮している。

Phase1 運転ではHERへの入射アクセプタンスが大きく入射器Linacから送り出すビームのエミッタンスが大きくても受け入れられる状態であったので、2016年2月22日から始まったHERへの電子入射では先に準備のできていた熱電子銃からのビームを用いた。またPhase1での目標電荷量はバンチ当たり1 nCであった（最終仕様値は5 nC）ので、この電荷量で調整したビームを入射した。典型的な熱電子銃からHERへの

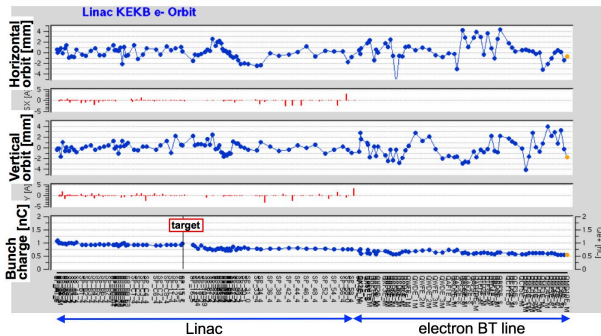


Figure 4: Transmission of electron beam from thermionic gun in HER injection.

ビーム入射状況を図4に示す。図の横軸は前段入射部からLinac全長、さらにビームトランスポートラインを経てHER入射点までをその距離に沿ったもので、上から下へ3つ並んでいるプロットは水平方向及び垂直方向の軌道のずれと透過電荷量の変化を示したものである。最上流で約1 nCある電子ビームの電荷量が途中で漸減していくが入射点まで0.5 nC程度到達しており、HERのコミッションングを進めていくには十分な量であった。熱電子銃からの電子ビームの典型的なバンチ長は8 ps(FWHM)であり、エミッタンスはLinac終端部付近で測定した規格化値で160, 300  $\mu\text{m}$ (水平、垂直方向)であった。

そしてRF電子銃からのビームについてもLinac内のビーム調整を進めた結果、5月31日にはHER入射が試みられ初めて成功した。6月8日からはHER入射は全面的にRF電子銃からのビームで行われ、6月18日までの期間問題なく入射を行うことができた。6月18日に入射器棟での空調の水漏れ事故の影響を受けてレーザー発振器が止まってしまったためそれ以降は熱電子銃からのビーム入射に切り替えたが、レーザー及びRF電子銃自身は十分に連続運転に使用できることが示された。RF電子銃からHERへの入射ビームの電荷量については熱電子銃とほぼ同じ1 nCが達成された。またパルスごとの電荷量の変動についても昨年のビーム調

整時には20%程度あったものが5%程度に改善されている。RF電子銃からの電子ビームの典型的な（規格化）エミッタンス測定値は前段入射部出口のA1M部で20, 18  $\mu\text{m}$ (水平、垂直方向)であり、低エミッタンスの電子ビーム生成に成功している。なお、現状ではそれ以降でビームを通す時の軌道コントロールなどの調整が不十分であるためにエミッタンスが増大し、Linac終端部付近で測定した値では106, 77  $\mu\text{m}$ (水平、垂直方向)であった。低エミッタンスを維持したままLinac終端までビームを通すべくアラインメントと軌道制御の準備を進めている。

また、熱電子銃とRF電子銃からのビームの双方でパルス毎のビーム軌道の変動が問題となっている。RF電子銃では主に水平方向に0.6 mm程度の変動がある（垂直方向は0.2 mm程度）。その原因について現在調査中である。熱電子銃については時期によっては垂直方向に1 mm程度変動が起きることがある。何らかの理由で前段入射部から出るビームのエネルギーが変動し、ビーム合流部のディスパージョンの漏れによりそれが軌道のずれとなる可能性が考えられるが、これについても調査中である。これらは安定したビーム入射を阻害する要因となるので早急に解決すべき課題となっている。

## 3.2 陽電子ビーム入射

SuperKEKBでは陽電子ビームの電荷量をこれまでの4倍（4 nC）に増強することが要求されたので、陽電子源にはフラックスコンセントレータ（FC）型パルスソレノイドと大口径Sバンド（LAS）加速管を用いて陽電子捕獲効率を向上させることにした。FCはSLACやIHEPで用いられたものの設計をベースに開発を進めた[8]。FCは運転用1号機が2014年にビームラインに設置され、2015年夏前まで仮設パルス電源を用いて定格値の半分の6 kAでの通電運転及び陽電子生成試験を行った上で、2015年秋から実機電源を用いて定格電流値12 kAでの運転を始めたが周囲のDC的な磁場のある状態での通電中に大きな放電が発生しソレノイド本体がダメージを受けた。それ以降FCの運転値は6 kA以下に制限せざるを得なかったが、Phase1の運転はこの状態で行った。なお定格電流値まで使用可能な改良型FCについては現在開発を進めており[8]、Phase2運転からはそれを使用する予定である。

一方SuperKEKBでは電子のみならず陽電子ビームも低エミッタンス（規格化値で水平方向50  $\mu\text{m}$ 、垂直方向20  $\mu\text{m}$ ）で入射することが要求されているので、ダンピングリング（DR）を建設してLinacのビームを途中でDRに入射して冷却し、それをLinacに戻してさらに加速してからLERへ入射する方式を採用することになった。しかしDRは現在まだ建設中であり、Phase1の運転ではDRを使わずに陽電子のビームは大きなエミッタンスのまま加速してLERへの入射を行った。陽電子の入射状況を図5に示す。横軸にはLinac最上流部からビームトランスポートラインを経てLER入射点までの距離を取り、縦の3つのプロットはそれぞれ水平方向及び垂直方向の軌道と電荷量の変化を表している。横軸左から約4分の1の部分が陽電子生成ターゲットまでの一次電子ビームを表しており、熱電子銃の前段入射部ではバンチ当たり10 nC近い電荷量があるが2階

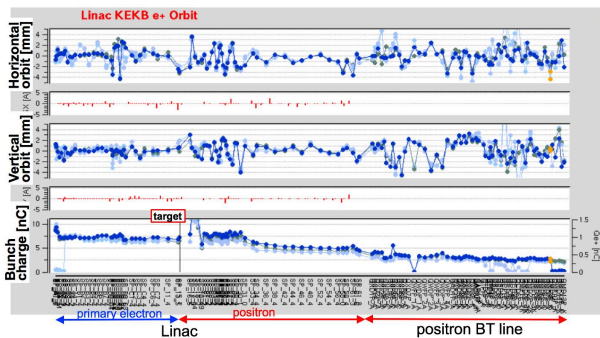


Figure 5: Transmission of positron beam in LER injection.

建ての合流部を越えたところで7 nCまで減少する。これはこの合流部の24度ラインでのエネルギーアクセプタンスに制約されて、運動量のずれの大きい粒子が失われるためであると思われる。しかしこれ以降はターゲットまで7 nCがほぼロスなく到達する。これより下流は陽電子ビームの電荷量を表すが縦軸のスケールが変わるので注意されたい。陽電子は2セクター終端までほぼ1 nCが透過し、それ以降3セクターで減少してLinac終端では0.6 nC、さらにビームトランスポートラインでも少し減少してLER入射点には0.3 nCが到達している。

本来陽電子ビームは2セクター終端からDRへ入射されるが3セクター以降は収束系のアクセプタンスが小さいので、エミッタンスの大きな陽電子をそのまま通すとビームロスが起きる。それを軽減するために2セクター先頭のコレリメータを狭くして現状では1 nC程度しか通っていないが、コレリメータを全開にすると2セクター終端までは2 nC近い陽電子が得られている。

なお電子に比べて少ない電荷量を補うために、陽電子入射については1つのビームパルス当たり2つのバンチを加速している。ストリークカメラで測定されたバンチ長は一次電子について15 psであり入射用電子の8 psより長い。これは電荷量が大きいためバンチ圧縮の性能が悪いためである。また陽電子のバンチ長は捕獲部のソレノイド収束系でのらせん軌道により一次電子の長さより伸びるはずであるが、まだ実測はされていない。エミッタンスはLinac終端部付近で測定した規格化値で1000, 1200  $\mu\text{m}$  (水平、垂直方向)であった。

### 3.3 パルスマグネット試験と高精度ビーム位置モニター読み出し系

LinacではKEKBの時代から部分的にパルスステアリングマグネットを導入して電子と陽電子の軌道を独立に調整する運転を行ってきたが、SuperKEKBではビームのオプティクス及び軌道をパルス毎に柔軟に切り替えることを実現するためにパルス四極及びパルスステアリング合わせて82台を配備する予定である。これらのためのパルス電流電源の開発を進めており、試作機電源とビームラインに先行設置したパルス四極マグネットを用いてビームの収束量をパルス毎に切り替える試験を行い、想定通りにビームサイズがパルス毎に変化する様子が観測された。なお、Phase2運転からはこのパルスマグネットのシステムがビーム運転に使用され

る予定である。

Linacのストリップライン型ビーム位置モニター(BPM)はその信号をオシロスコープで読み取ってデジタル化しビームの位置と電荷量を算出する仕組みであったが、位置分解能の向上とゲイン校正をオンラインで行うことを目指して新たな信号読み出しモジュールを開発した。ビームによる新読み出しモジュールの試験を進めており、位置分解能が50  $\mu\text{m}$ から5  $\mu\text{m}$ に向上することが確認された。現時点(2016年8月)では既にBPM全91台のうち36台が新モジュールに切り替えられており、Phase2運転からは全台数がこれにより運転される予定である。

## 4. まとめ

SuperKEKBのPhase1運転が2016年1月下旬から7月初旬まで行われた。その主要な成果として、(1)電子、陽電子リング共にビーム入射、蓄積に成功し、各種機器の立ち上げが行われ、安定したビーム運転が可能な状態が確立された。(2)リングの真空チェンバーのビームによる焼きだしが5か月間にわたって行われた結果、圧力のレベルは3桁以上向上した。(3)蓄積ビームの低エミッタンスを実現するためのビームオプティクス調整及び補正磁場作成用機器の設置により約10 pmのエミッタンスに到達した。

また入射Linacについては、(1)熱電子銃及びRF電子銃からのバンチ当たり電荷量約1 nCの電子ビームを安定に入射した。特に新たに導入されたRF電子銃についても10日間連続で入射に使用することができ、長期運転で使用するためのめどが立った。(2)フラックスコンセントレータを用いた陽電子捕獲系で生成した陽電子をバンチ当たり電荷量約0.6 nCで安定に入射した。(3)Phase2運転に向けてパルスマグネットや高精度型ビーム位置モニター信号読み出しモジュールなどの試験を進めている。

## 参考文献

- [1] 船越 義裕 他, MOOL02 “SuperKEKB のフェーズ1 のビームコミッショニング”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016
- [2] 佐藤 政則 他, MOP060 “SuperKEKB 入射器コミッショニングの現状 (III)”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016
- [3] 末次 祐介 他, TUP105 “SuperKEKB 真空システムのコミッショニング”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016
- [4] 杉本 寛 他, MOP062 “SuperKEKB の初期コミッショニングにおけるビーム光学の測定とその補正”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016
- [5] 周 翔宇 他, FSP022 “KEK 電子陽電子入射器の現状”, 第12回日本加速器学会年会、敦賀、2015
- [6] 横山 和枝 他, FSP020 “KEK 電子陽電子入射器の現状”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016
- [7] 夏井 拓也 他, MOP064 “SuperKEKB 用 RF gun のコミッショニング状況”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016
- [8] 榎本 嘉範 他, MOP063 “SuperKEKB 用フラックスコンセントレータの開発”, 第13回日本加速器学会年会、千葉、2016