

SuperKEKB 入射器におけるビーム位相空間ジッタと有効エミッタンス BEAM PHASE SPACE JITTER AND EFFECTIVE EMITTANCE IN SUPERKEKB INJECTOR LINAC

清宮 裕史*, 飯田 直子, 佐藤 政則, 紙谷 琢也
Yuji. Seimiya*, Naoko. Iida, Masanori. Satoh, Takuya. Kamitani,
High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

Abstract

In SuperKEKB linac, stable high charged low emittance beam is necessary. Transported beam to SuperKEKB Main Ring (MR) must be stable to the extent that the beam can be injected inside MR acceptance. SuperKEKB requirement must be satisfied for emittance including beam phase space jitter, called as effective emittance. Large amplitude beam position jitter has been measured at linac end. We evaluated that the effect of the beam position jitter on effective emittance and investigated the source of the beam phase space jitter.

1. INTRODUCTION

SuperKEKB は KEK の高エネルギー素粒子物理学のための電子陽電子衝突型加速器である。SuperKEKB のデザインルミノシティは $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、これは KEKB [1] で達成されたルミノシティの約 40 倍に相当する。この高いルミノシティを達成するために、KEKB と比べて 2 倍の電流且つ 20 分の 1 のビームサイズを実現する必要がある。この電流とビームサイズを実現するためには、入射器で生成される高電荷且つ低エミッタンスの高品質ビームを SuperKEKB メインリングまで輸送しなければならない。もし輸送の間にビームの品質が悪化し、ビームの位相空間の面積が SuperKEKB メインリングのアクセプタンスより大きくなってしまふと、そのアクセプタンスには入らなかった粒子はロスしてしまい、入射効率が悪化する。この悪化に伴い見かけ上のリングのライフタイムが減少するため、リングの電流を上げることができず目標とするルミノシティへの到達が困難となってしまふ。

SuperKEKB プロジェクトの Phase II コミッションングが 2018 年 3 月から 2018 年 7 月まで行われた。Belle II 検出器に入るバックグラウンド低減のためのコリメータ調整、衝突ビームサイズをより絞るための低 β 調整、ルミノシティ向上のための電子陽電子の衝突調整を始めとした様々な研究が行われた [2]。2018 年冬に予定されている Phase III では、より高品質なビームを用いて、より高度な調整が行いつつ本格的な物理実験が開始されることになっている。Phase II で入射器終端で達成された電子ビームのエミッタンスと電荷量、Phase III における最終的な要求値を表 1 にまとめる。Phase II では、1 nC の電子ビームのエミッタンス増大を $40 \mu\text{m}$ 程度まで抑えることに成功したが、Phase III の最終的な要求は 4 nC のビームで水平/垂直エミッタンスを、それぞれ $40/20 \mu\text{m}$ 以下にする必要があるため、達成のためにはより多くの努力が必要であると考えられる。

Table 1: Target Values of Beam Parameters at Linac End for SuperKEKB Electron Ring

	H/V Emittance	Charge
Phase II (achieved)	40/40 μm	1 nC
Phase III (final)	40/20 μm	4 nC

図 1 は、SuperKEKB 入射器の構成図である。SuperKEKB 入射器はセクター A, B, J-ARC, C, and 1~5 で構成されている。入射器では、2 種類のタイプの電子銃を用いて運転が行われている。1 つは陽電子を生成するための高電荷電子ビーム生成用の熱電子銃である。熱電子銃で生成された高電荷電子ビーム (10 nC) はセクター 1 のタングステンのターゲットに衝突し制動放射、対生成が起こる。対生成によって生まれた陽電子はターゲット直後の Flux Concentrator, 収束ソレノイドで効率良く捕獲される。陽電子は 2 セクター終端からダンピングリングへ輸送され、そこで低エミッタンスとなった陽電子が SuperKEKB の陽電子用リングへ輸送される。陽電子ビームには専用のダンピングリングが存在するため、エミッタンスに対する要求は電子用リングへ輸送される電子ビームと比べて厳しくない。もう 1 つは低エミッタンスビーム用のフォトカソード RF 電子銃である。フォトカソード RF 電子銃から生成された電子ビームはセクター 1 のターゲットの孔を通過し、SuperKEKB の電子用リングへ輸送される。電子用のダンピングリングは存在しないため、エミッタンス増大を最小限に抑えながら電子ビームを SuperKEKB リングまで輸送しなければならない。本研究は、エミッタンス増大抑制が重要となるターゲット孔を通過する電子ビームについて調査を行ったものである。

これまで入射器におけるエミッタンス増大を抑えるビーム輸送に関する研究が行われてきた [3-6]。エミッタンス増大の主な原因の 1 つは、ビームが加速管を通過することによって発生する wake 場によって、ビーム後方の粒子が蹴られてしまうことにある。この wake 場による影響は、電荷量だけでなくビームが加速管を通過する位置 (中心軸からの距離) に依存

* seimiya@post.kek.jp

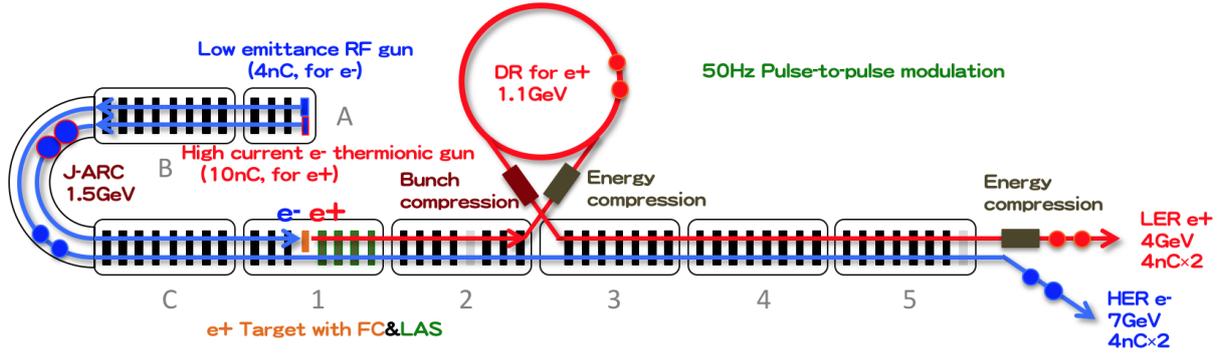


Figure 1: Schematic layout of the SuperKEKB injector linac.

する。加速管の中心軸にビームを通すことができなくとも、何本もある加速管全体で wake 場を打ち消すことのできる軌道を探すことで、エミッタンス増大を最小限に留めることができる。エミッタンス増大の他の原因として、ショットバイショットのビーム位相空間ジッタ（ビームジッタ）が考えられる。メインリングへ輸送されるショットバイショットのビームは、メインリングのアクセプタンスに収まる程度には安定でなければならない。つまり、SuperKEKBの要求は、ビームジッタを含んだエミッタンス（有効エミッタンス）に対して満たされる必要がある。そのため、ビームジッタによるエミッタンス増大の評価とビームジッタの原因調査を行った。

2. EFFECTIVE EMITTANCE AND JITTER EMITTANCE

ビームジッタによるエミッタンス増大を評価するために、次のように有効エミッタンスを定義する。

$$\begin{aligned}
\epsilon_{eff} &= \sqrt{\langle X^2 \rangle \langle X'^2 \rangle - \langle XX' \rangle^2} \\
&= \sqrt{\epsilon_0^2 + \epsilon_j^2 + 2\epsilon_0\epsilon_j \frac{\gamma_0\beta - 2\alpha_0\alpha + \beta_0\gamma}{2}} \\
&= \sqrt{\epsilon_0^2 + \epsilon_j^2 + 2\epsilon_0\epsilon_j B_{mag}}. \quad (1) \\
X &= x + \Delta x, \quad X' = x' + \Delta x', \\
\epsilon_0 &= \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}, \\
\epsilon_j &= \sqrt{\langle \Delta x^2 \rangle \langle \Delta x'^2 \rangle - \langle \Delta x \Delta x' \rangle^2},
\end{aligned}$$

ここで ϵ_0 と ϵ_j は、それぞれデザインエミッタンスとビームジッタによるエミッタンス（ジッタエミッタンス）である。 B_{mag} は、Twiss パラメータの測定値と実測値とのミスマッチを表す量である。この B_{mag} は必ず 1 以上の値を持ち、ミスマッチが無い場合は 1 に等しい。もしミスマッチが無ければ、Eq. 1 から分かるように、有効エミッタンスはデザインエミッタンスとジッタエミッタンスとの和に等しくなる。通常、マッチング後に Wire scanner にて測定された B_{mag} の値は、およそ 1~2 程度であり、 B_{mag} が有効エミッタンスに与える影響は大きくない。そのため、以降は主にジッタエミッタンスに焦点を当て

た内容となる。ジッタエミッタンス測定には、ビーム位置ジッタとビーム角度ジッタの情報が必要となるが、前者はビーム位置モニタ (BPM) から、後者は BPM 間の転送行列を用いて求めることができる。

3. RESULTS

図 2 は、上から順に測定されたビーム位置ジッタ、ジッタエミッタンス、 β 関数を表し、横軸は入射器の電子銃後から入射器終端までの進行方向の位置を表している。ビーム位置ジッタは、ビーム位置の標準偏差である。図の横軸がおよそ 140 m の地点が J-ARC セクションである。このセクションは水平ディスパージョンが存在するため、ビームのエネルギージッタがディスパージョンを介してビーム位置ジッタとなっている様子が伺える。J-ARC セクションのディスパージョンの最大値がデザインでは約 0.8 m であることと、その場所におけるビーム位置ジッタが約 $360 \mu\text{m}$ であることから、J-ARC におけるビームのエネルギージッタは約 0.045% であることが分かる。ビームジッタの要因は、ジッタエミッタンスが増加し始める場所に存在する。図 2 では、J-ARC 後と 290 m 地点に存在する陽電子生成用ターゲット後にジッタエミッタンスの増加が見られる。この測定では、入射器終端にて水平/垂直ジッタエミッタンスはおよそ $27/7 \mu\text{m}$ であった。Phase III の最終要求である $40/20 \mu\text{m}$ に対してジッタエミッタンスが占める割合が非常に大きいことが分かる。図 3 は、BPM で測定されたビーム位相空間ジッタを表しており、上から順にターゲット前、ターゲット後、入射器終端部のデータである。また、図 3 の左 3 つは水平、右 3 つは垂直方向のデータとなる。この図からも分かるように、ターゲット前後にて明らかにジッタエミッタンスが増加している。

ビームジッタ源の場所として、J-ARC 直後とターゲット付近に存在する可能性が高いことがこれまでの調査で判明した。まず、J-ARC 直後にビームジッタが増加してしまう原因を考える。ビームジッタが発生する原因はいくつか考えられるが、J-ARC 付近にビームに強い非線形効果を発生させるような機構やパルス的に動作する装置が存在しないことから、ディスパージョン漏れが疑われたため測定を行った。入射器におけるディスパージョン測定結果を図

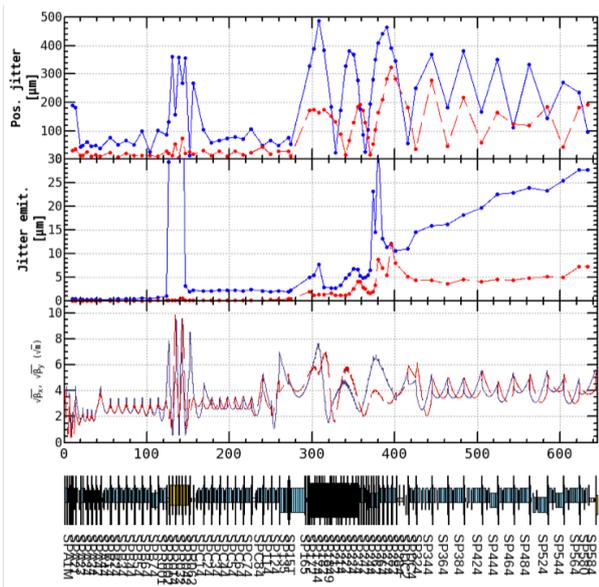


Figure 2: Measured beam position jitter and jitter emittance in the linac. The electron beam was 1 nC and generated by RF gun.

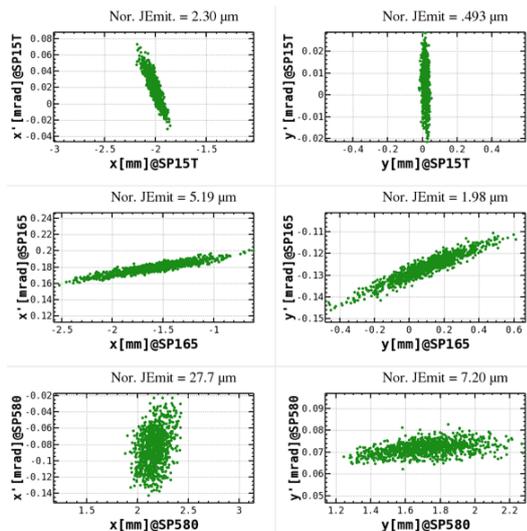


Figure 3: Beam phase space jitter at before, after the target, and linac end.

4に示す。非常に大きなディスパージョン漏れが見て取れる。このディスパージョン漏れを抑制するため、J-ARC内の4極磁石の強さを調整し、再度測定を行った結果が図5である。J-ARC後のディスパージョン漏れがほぼ消えていることが分かる。ディスパージョン抑制後のビーム位置ジッタとジッタエミッタンス測定値を図6に示す。J-ARC後のディスパージョン漏れを抑制することによって、ジッタエミッタンス増大も抑制された。このときの水平/垂直ジッタエミッタンスは、入射器終端で1.8/0.9 μm となった。これまでの測定は全て1 nC時のものであるが、ディスパージョン漏れを抑制すれば少なくとも

1 nC 運転時にはジッタエミッタンスの影響は無視できる程度に抑えることが可能である。

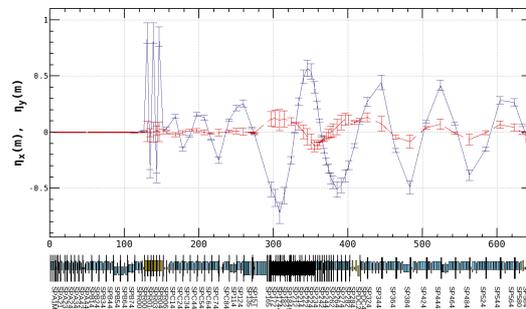


Figure 4: Dispersion measurement before the dispersion suppression.

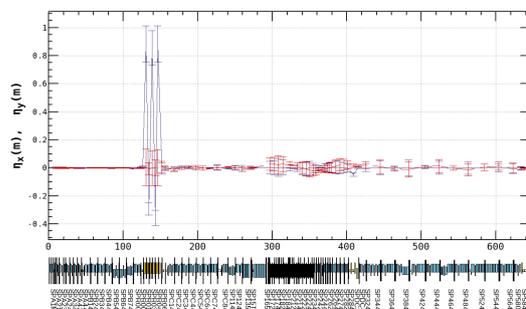


Figure 5: Dispersion measurement after the dispersion suppression.

ディスパージョン抑制によってジッタエミッタンスは改善したが、依然としてターゲット前後でジッタエミッタンスは増大しており、実はターゲット前後のジッタエミッタンスの比はディスパージョン抑制によらずほぼ一定であった。例えば予期しないジッタ源がターゲット上流で発生してしまった場合、必ずターゲット周辺でそのビームジッタが増幅されてしまうことになるため、この原因を追求し解消する必要がある。

ターゲット周辺には、ビームジッタに影響する可能性のある装置が幾つか存在する。それは flux concentrator、DC ソレノイド、ブリッジコイル、パルス電磁石、シケインである。これらの寄与を調査するため、それぞれの機器を ON/OFF しビーム位置ジッタを比較したが、ほぼ同等の値であったため、これらがビームジッタの原因ではないことが分かった。また、ターゲット孔を通る電子ビームがターゲット後に位置ジッタが増大するのに対して、ターゲットに衝突させて生成された陽電子の位置ジッタは大きな変化が見られなかった。そのため、ターゲット孔 ($\phi = 2 \text{ mm}$) で発生する wake 場がビームジッタの増幅に寄与している可能性が考えられた。そこで、CST studio [7] によるターゲット孔の wake 場シミュレーションを行い、測定されたビームジッタの再現が可能か調査を行った。図7は、左/右の図がそれぞれ横/縦方向のターゲット孔による wake 場を示してい

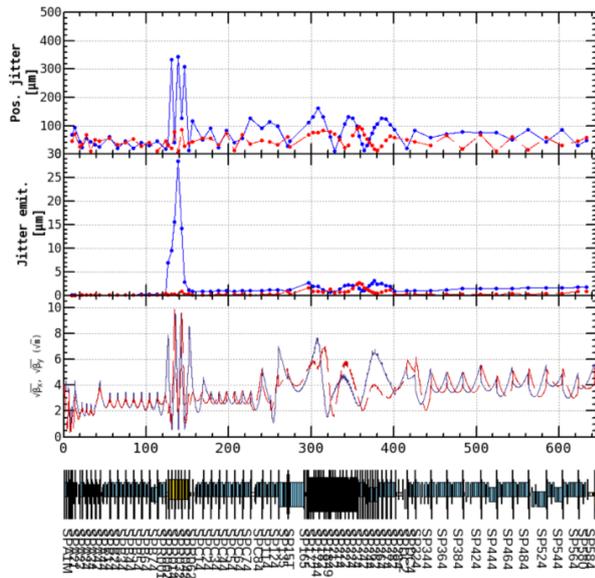


Figure 6: Measured beam position jitter in the linac after dispersion suppression. The electron beam was 1 nC and generated by RF gun.

る。ビームの通過する位置がターゲット孔の中心から外れるほど、高次の wake 場の影響が見えている。しかし、ターゲット孔の外側すれすれをビームが通過したとしても、 β 関数がデザインの 100 倍以上の値でない限り説明できないほどの量であり、シミュレーションからは測定されたターゲット周辺のビームジッタ増幅率を説明できないことが判明した。

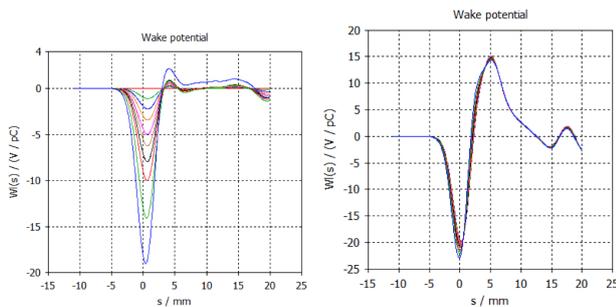


Figure 7: Transverse (left figure) and longitudinal (right figure) wake potential induced by positron generation target, respectively. Color variation shows beam position from the center of the target hole, 0.1 mm, 0.2 mm, ..., 0.9 mm.

4. CONCLUSION

ビーム位相空間ジッタは J-ARC セクション後のディスパージョン漏れを抑制することで減少した。また、1 nC 以下の運転では、ビーム位相空間ジッタの影響を無視できる程度に抑えることができた。しかし、陽電子生成用ターゲット前後のビーム位相空間ジッタの増幅率はディスパージョン抑制の有無で

変化は見られなかった。Phase III では、4 nC の高電荷低エミッタンスビームが必要であり、高度で安定な制御が求められる。不安要素は可能な限り取り除く必要が有るため、ターゲット周辺のビーム位相空間ジッタ増幅率について原因追求を進めた。

ターゲット周辺でビーム位相空間ジッタに影響を及ぼす可能性のある flux concentrator を始めとする機器について調査を行ったが、その影響は小さいことが分かった。次にターゲット孔による wake 場がビーム位相空間ジッタに及ぼす影響を調査したが、その影響はシミュレーション上では測定した増幅率を説明するには小さすぎることが判明した。ターゲット周辺でのビーム位相空間ジッタ増幅の原因を明らかにするために現ターゲットを一時的に取り外し、ターゲット孔の大きさを変えることのできるダミーターゲットを用いて、2018 年秋の運転にて詳細な原因究明が行われる予定である。

謝辞

This work was partly supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16K17545.

参考文献

- [1] KEKB Design Report, KEK Report 95-7.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, in *Proc. of PASJ18*, Nagaoka, Niigata, Japan, paper WEOLP01 (2018).
- [3] L. Zang *et al.*, in *Proc. of IPAC11*, San Sebastian, Spain, paper MOPS058 (2011).
- [4] H. Sugimoto *et al.*, in *Proc. of IPAC12*, New Orleans Louisiana, USA, paper TUPPC021 (2012).
- [5] S. Kazama *et al.*, in *Proc. of IPAC15*, Richmond, VA, USA, paper MOPWA053 (2015).
- [6] Y. Seimiya *et al.*, in *Proc. of IPAC17*, Copenhagen, Denmark, paper TUPAB005 (2017).
- [7] CST home page; <https://www.cst.com>