

SuperKEKB 陽電子ダンピングリングの入出射路コミッショニング COMMISSIONING OF THE INJECTION AND EXTRACTION BEAM LINES OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPERKEKB

飯田直子*, 池田仁美, 石橋拓弥, 植木竜一, 大西幸喜, 梶裕志, 紙谷琢哉, 菊池光男, 小磯晴代,
小林鉄也, 杉村仁志, 杉本寛, 清宮裕史, 船越義裕, 宮原房史, 森隆志, 矢野喜治, 周徳民

Naoko Iida*, Hitomi Ikeda, Takuya Ishibashi, Ryuichi Ueki, Yuki Yoshi Ohnishi, Hiroshi Kaji, Takuya Kamitani,
Mitsuo Kikuchi, Haruyo Koiso, Tetsuya Kobayashi, Hitoshi Sugimura, Hiroshi Sugimoto, Yuji Seimiya,
Yoshihiro Funakoshi, Fusashi Miyahara, Takashi Mori, Yoshiharu Yano, Demin Zhou
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Positron damping ring (DR) for SuperKEKB successfully started its operation in February 2018, and continued until the end of Phase 2 of SuperKEKB in July without serious troubles. This paper describes current status of the beam commissioning of the injection (LTR) and the extraction (RTL) lines between LINAC and DR. In the LTR commissioning, the positron having high emittance, and wide energy spread should be transported and injected into the DR. In the RTL commissioning, care has to be taken on preservation of the low emittance beam. The observed emittance growth of RTL was not a problem for Phase 2, but it should be resolved in the coming Phase 3.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器 (以下、SuperKEKB) は $\Upsilon(4S)$ を大量に作り出すことを目的とした、7 GeV の電子用リング (HER) と 4 GeV の陽電子用リング (LER) の衝突型円形加速器で、物理検出器は Belle II である。1999 年から 2010 年まで稼動していた KEKB 加速器 [1] は当時の世界最高ルミノシティ、 $2.1 \times 10^{34} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ を記録した。SuperKEKB はそのアップグレード版で、ピークルミノシティをさらに 40 倍に増やすために、ナノビーム方式という低エミッタンスビームの衝突方式を採用したため、入射ビームも低エミッタンスであることが要求される。また蓄積ビームが低エミッタンス、大電流であることから寿命が短いため、供給される入射ビームの電荷量も高い必要がある。

入射ビームを低エミッタンス、および高電荷量にするため、電子ビームは RF 電子銃 [2] を、陽電子ビームはダンピングリング (DR) [3] とフラックスコンセントレーター (FC) [4] を採用することとした。FC は陽電子ターゲット直下流に設置されたパルスソレノイドで、ターゲットから出てきた陽電子を高効率で収集するため陽電子ビームの進行方向の位相分布は広範囲にわたり、DR まで効率よくビームを輸送する工夫が必要となる [5]。SuperKEKB は目的ごとに大きく分けてフェーズ 1、2、3 で運転する。2016 年 2 月、Belle II の最内部検出器なし、衝突なしで約 5 ヶ月間の試運転 (フェーズ 1) [6, 7] を成功させた。その後約 1 年半さらなる改造を行い、2018 年 1 月から DR のコミッショニング、3 月から 7 月までは Belle II の最内部検出器を一部組み込んだ衝突実験 (フェーズ 2) [8] を行った。SuperKEKB-LER の陽電子入射ビームへの要求パラメーターを Table 1 に示す。SuperKEKB からの要求値は、衝突性能に応じて

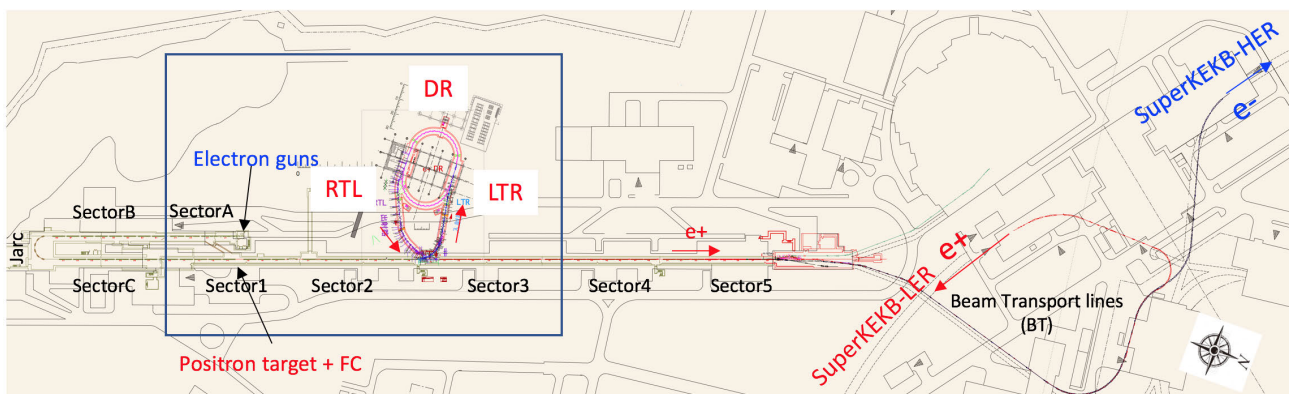


Figure 1: LINAC consists of eight sectors from Sector A to Sector 5 starting from the electron sources. The electron and positron beams are accelerated up to 7 GeV and 4 GeV, respectively, and are injected into HER and LER of SuperKEKB via each beam transport line (BT). Both of the injection line for DR (LTR) and the extraction line from DR (RTL) have two arc sections and a straight section between the arc sections.

* naoko.iida@kek.jp

徐々に最終値に近づけていく。

DR は Fig. 1 に示すように、電子陽電子線形加速器 (LINAC) の陽電子ターゲット下流約 120 m に設置された周長約 135.5 m のリングである。LINAC の 2 セクター終端から 1.1 GeV の陽電子を取り出し DR に入射、低エミッタンスとなった陽電子ビームを DR から取り出して再び LINAC の 3 セクター先頭に戻す。LINAC から DR への入射路を LTR、出射路を RTL と呼ぶ。FC からの巨大なエネルギー広がり のビームは DR のエネルギーアクセプタンスの範囲を超えているため、LTR の第 1 アークと下流に設置した加速管でエネルギー圧縮装置 (ECS) としている。また、DR の加速周波数は SuperKEKB と同じ約 508 MHz であるが、出射されたビームを LINAC の加速周波数 2856 MHz に戻すにはバンチ長が長すぎるため、RTL 第 2 アークとその上流に設置した加速管でバンチ長圧縮装置 (BCS) としている。DR 前後のビームパラメーターを Table 2 に、これらのパラメーターでシミュレーションした進行方向位相空間の粒子分布を、Fig. 2 に示す。DR の出射パラメーターは当初の設計 [3] とはエミッタンスが異なるが、RF 電圧が設計値の 1.4 MV から 1 MV に変更されたため、設計エミッタンスが $89 \mu\text{m}$ から $64.3 \mu\text{m}$ となった。Figure 2

Table 1: Required Parameters of Injection Beam for SuperKEKB-LER

	Extraction	Phase2	Phase3-
$\gamma\epsilon_x [\mu\text{m}]$	64.3	< 200	< 100
$\gamma\epsilon_y [\mu\text{m}]$	3.2	< 40	< 15
$\sigma_\delta [\%]$	0.055	0.16	0.10
Charge [nC]	1.5	1.5	4.0

Table 2: Design Parameters of the Injection and Extraction Beam for DR (* shows a full width.)

Parameters	ECSin	ECSout	BCSin	BCSout
		=DRin	=DRout	
$\gamma\epsilon_x [\mu\text{m}]$		2800	64.3	
$\gamma\epsilon_y [\mu\text{m}]$		2600	3.2	
$\sigma_z [\text{mm}]$	$\pm 8^*$	$\pm 30^*$	6.6	1.3
$\sigma_\delta [\%]$	$\pm 5^*$	$\pm 1.5^*$	0.055	0.8
$R_{56} [\text{m}]$	-0.61			-1.05
$V_c [\text{MV}]$	41			21.5

に示すように、LTR では FC からの陽電子はエネルギーテールが長いので、そのまま ECS を通すと LTR や DR 内でビームロスを起こす。ECS のアーク部には 4 台のコリメーターを設置し、予めエネルギーテールをカット ((a) の Before ECS で赤い部分) することでエネルギー広がりを $\pm 5\%$ とし、ECS 下流ではこれが $\pm 1.5\%$ に圧縮され DR のバケットハイト内に入る。DR から出射されたビームのバンチ長は BCS で 6.6 mm から 1.3 mm に圧縮する。 V_c は 18.4 MV の方

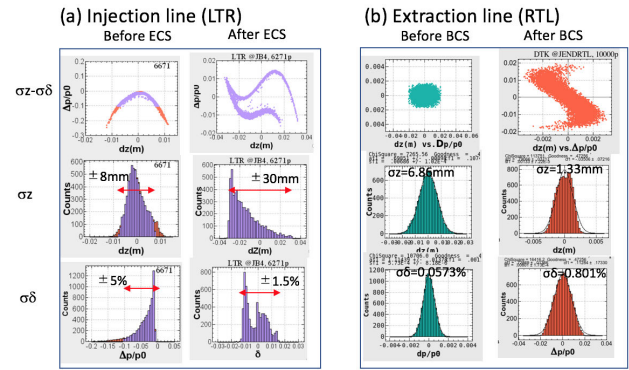


Figure 2: Simulated distributions of longitudinal phase space before and after ECS, and those of BCS.

がバンチは圧縮されるが、21.5 MV としてさらに傾きをつけた方が (Fig. 2(b) の After BCS)、LER への入射点でのエネルギー広がりが狭いことがシミュレーションにより明らかとなったため、21.5 MV を採用した。BCS、ECS 共に S-band の周波数よりもビームのバンチ長が長いので、Fig. 2 の “After ECS/BCS” のように S-band のサイン波が見えているが、パラメーター (R_{56} , V_c) を Table 2 のように選ぶことによってほぼロスなくビームを輸送することができる。

2. LTR のコミッショニング

2018 年 1 月 23 日、LTR コミッショニングを開始した。最初は DR に調整していないビームが行かないように LTR 最後部にビームシャッターを挿入して調整を行い、2 日目の 24 日にはビームシャッターまでビームを導くことに成功した。当初は FC をスタンバイにして電荷量は 0.75 nC で運転した。DR は KEK の敷地境界から約 30 m と近く、FC からの巨大なビームをロスすることなしに輸送する必要がある。Figure 3 に、LTR のオプティクスを示す。LTR の第 1 アークの R_{56} とその下流の加速管の V_c が ECS を構成している。コリメーターを第 1 アークの中、

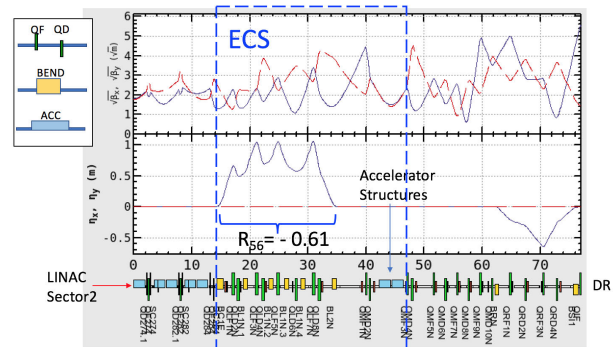


Figure 3: Optics plot of LTR. The upper graph shows the horizontal and vertical beta functions as a blue and red lines, respectively. The lower graph shows the horizontal dispersion. The horizontal axis shows the distance in meter from the end of Sector2 in LINAC.

水平分散の大きい4箇所を設置している。

2.1 LTR の調整

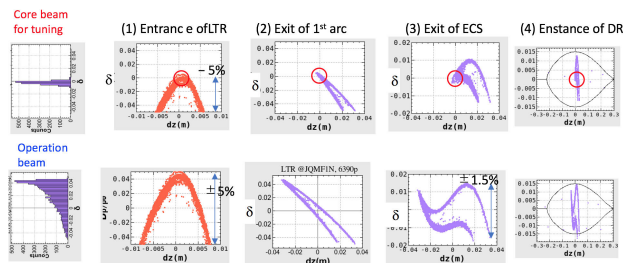


Figure 4: Distributions in the longitudinal phase space at each point as shown in the upper region. The upper figures show the distributions of “core beam” for only LTR tuning. The small circles show the center of vacuum chambers. The lower figures show those of the operation beam.

実際に FC からのビームを調整するには、特にアーク部でビームが Fig. 2 (a) のように非対称分布のためビーム位置モニター (BPM) からの情報だけでは見誤ってしまうことになる。まず4台のコリメーターを使って調整用コアビームを作る。Figure 4 の上段のようにビームのエネルギーピークを真空チェンバーの真ん中に来るように2セクターエネルギーノブで調整し、ピーク部だけを残すようにコリメーターでカットし“コアビーム”とする。このビームを使って ECS のゼロクロスを求める。具体的には ECS 加速スタンバイとオンとでビームエネルギーが変わらない位相を探す。ビームエネルギーが変わらないかどうかは下流の LTR 第2アークの水平分散の大きな場所での変位がゼロであることを確認する。また、コア

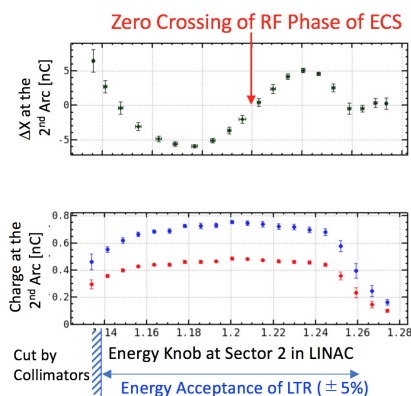


Figure 5: The upper graph shows the “zero-crossing” search by changing the energy of “core beam”. The lower graph shows the energy acceptance of the LTR. The horizontal axis represents the energy of the core beam in arbitrary units.

ビームを使って LTR 第1アークのアクセプタンスを測定した結果を Fig. 5 に示す。第1アークのエネルギーの低いビームが通る場所は下図の左側に斜線で示したように、運転時にはコリメーターでカットし

ている。DR への入射調整もコアビームを用いて行い、一度調整したら運転用のビームで ECS 調整、DR 入射調整をしてはならない。次に運転用ビームを作る。コアビームを作っていたコリメーターを一旦全開にし、LINAC でビームエネルギーをコアビームよりも5%上げ、再度コリメーターで-5%以下をカットするように調整する。こうすることで、コアビームが通った軌道の周り、つまり真空チェンバーおよび進行方向位相空間の中心を運転ビームが回転しながら進むことになり、ビームロスを最小限に抑えることになる。

その他にも基本的な測定を行った。すなわち、3-BPM、ローカル・バンプスタディ、Beam Based Alignment(BBA)、Single kick response 測定等である。

2.2 FC の効果

Table 3: Measured Emittances by Wire Scanners at the Straight Section of LTR When FC is Stand-by and On

	FC: Stand-by	FC: 5kV
$\gamma\epsilon_x [\mu\text{m}]$	2350	2760
$\gamma\epsilon_y [\mu\text{m}]$	2310	2450
Charge [nC]	0.75	1.5

2月22日に、FC をオンにして運転した。FC の電圧を5kVでオンにすることで、LTR を通るビームの電荷量は0.75 nC の約2倍の1.5 nC になった。LTR の直線部に設置された4台のワイヤスキャナー [9] によって、エミッタンスを測定した結果を、Table 3 に示す。FC のオン・オフで測定されたエミッタンスに有意な違いはなかった。また、FC の状態によって DR 内のロスモニター信号 [10]、および RF システムのアークセンサーには有意な違いは生じなかった。

3. RTL のコミッショニング

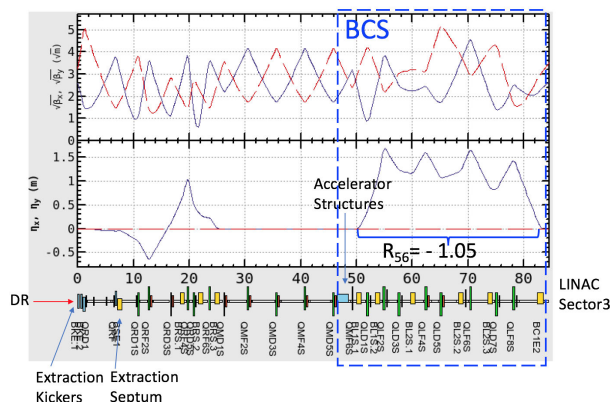


Figure 6: Optics plot of RTL. The notations are same as Fig. 3.

2月8日、DR にビームが周回すると同時に RTL に出射され、2月10日にはBCS調整後のビームがLINAC 終端のビームダンプまで導かれた。DR で低

エミッタンスになったビームはLTRの時とは異なりビームロスの心配はあまりないが、エミッタンスを低く保ったままビームを輸送しなければならない困難がある。Figure 6に、RTLのオペティクスを示す。RTLの直線部に設置されたS-band加速管の V_c と第2アークの R_{56} でBCSを構成している。

3.1 RTLからBTのECS調整

LTRのECSと同様に、まずBCS加速管をスタンバイにして軌道補正し、加速管をオンにしても軌道が動かない位相をゼロクロスとして設定した。その後、位相がゼロか π かを、LINAC終端の水平分散のある場所でのスクリーンモニターを見て区別した。しかしその判定を待たずとも、逆位相の場合はLINAC 3セクターから5セクターの間でビームがうまく通らずにロスしてしまうことでも確認できる。BCSの位相を正しく設定後、3～5セクターの加速管の位相調整を行い、最後にLINAC終端のECSのゼロクロス調整を行う。調整後のLINAC終端でのエネルギー広がりスクリーンモニターでの確認では全幅で約 $\pm 0.3\%$ となり、Table 1のSuperKEKB-LERからの要求値を満たしている。

3.2 水平分散の補正

DRからRTLを経て、3セクターのワイヤースキャナーでエミッタンス測定を行ったが、最初に測定された水平規格化エミッタンス($\gamma\epsilon_x$)は約 $300\mu\text{m}$ と大きく、DRの設計値である $64\mu\text{m}$ の4倍以上もあった。しかし、垂直規格化エミッタンス($\gamma\epsilon_y$)は小さく、約 $2\mu\text{m}$ であったことから、この増大はRTLの2つのアーク部で発生した水平分散の漏れが一因と考えられる。Table 4に示すように、LTR、RTLの各アーク部で水平分散補正を行った。

Table 4: $\langle\eta_x\rangle$ show the mean squares of horizontal dispersion at the BPM in the straight line downstream of the arc. Those values show the measured dispersions before and after the quads are multiplied by the fudge factor.

Arc	$\langle\eta_x\rangle[\text{m}]$		Fudge Factor [%]
	Before	After	
LTR 1st	0.037	0.018	-3.3, -2.4
RTL 2nd	0.079	0.019	-4.5
RTL 1st	1.05	0.09	-8.2

LTR第1アークでは2セクターのエネルギーノブを、RTL第2アークではBCS加速位相をそれぞれ変える事で、アークを通るビームエネルギーを変え、アーク部およびそこを出た直線部のBPMで水平位置の変化を測定し水平分散を求めた。また、RTL第1アークの測定でビームエネルギーを変えるにはDRのRF周波数を変えたまま出射せねばならず、それは実際には困難であったため、その代わりに第1アークを構成する全ての電磁石の磁場の強さを一様に変化させることでビームエネルギーを変える事と同等とした。ただし第1アーク内の偏向電磁石は、

出射キッカー、出射セプタム、およびDC偏向電磁石の3種類あり、それぞれ励磁曲線が異なる。しかも出射キッカー、出射セプタムは電圧と共にファイヤーするタイミングも変わるため、水平分散測定の前に軌道のレスポンスを測定してから本測定を行った。RTL第1アークの水平分散補正前後の測定を、Fig. 7に示す。青の破線で囲まれた領域は設計では水平分散がない場所であるが、(a)では大きな分散が測定されているのに対して、(b)では設計値に近づけることができた。しかし、Table 4の補正後の水平分散をTable 1のBCS前後のエネルギー広がり仮定して水平エミッタンスに換算すると、BCS前では $\Delta\gamma\epsilon_x=0.33\mu\text{m}$ 、BCS後では $\Delta\gamma\epsilon_x=69.7\mu\text{m}$ となるが、より詳細な検討が必要であり、今後さらに水平分散を小さくする必要がある。

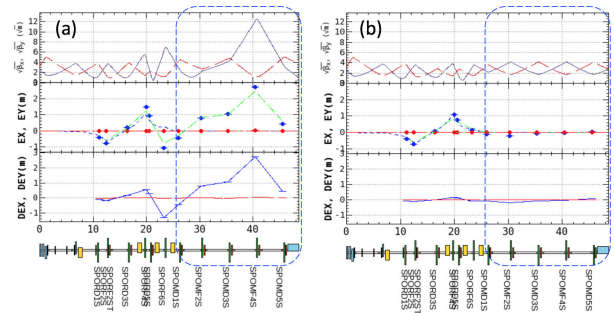


Figure 7: Measured horizontal dispersions of the 1st arc in RTL. (a) and (b) show the results before and after the correction, respectively. In order from the top, the horizontal (blue line) and vertical (red line) beta functions, dispersions, and deviation from the design of the measured dispersion. The blue points in the middle graph show the measured dispersion, the blue lines show the design dispersion, and the green lines are estimated dispersion by fitting the strength of quads in the arc to reproduce the measured dispersions.

全てのアークで水平分散を補正後、3セクターおよび5セクターのワイヤースキャナーでエミッタンス測定を行った結果をTable 5に示す。

Table 5: Measured Emittances by the Wire Scanners at Sector 3 and 5, and the Required Parameters of Injection Beam for Phase 2 and 3 of SuperKEKB-LER

	Sector 3	Sector 5	Phase 2	Phase 3
$\gamma\epsilon_x [\mu\text{m}]$	126 ± 8.2	189 ± 64	< 200	< 100
$\gamma\epsilon_y [\mu\text{m}]$	1.5 ± 0.1	1.9 ± 0.3	< 40	< 15

3セクターで測定された $\gamma\epsilon_y$ とTable 1に示すDRの設計水平エミッタンスから、DRのXYカップリング(κ)を推定すると、 $\kappa \leq 2.3\pm 0.2\%$ となり、十分小さな値と言える。しかし、3セクターから5セクター間で水平エミッタンスの増大が起きている。これについてはLINAC加速管のトランスバース・ウェイクが原因の一つと考えられ、軌道のオフセッ

トによるウェイク場のキャンセル等を行う予定である。LINAC 終端の5セクターでのエミッタンスは、フェーズ2の要求は満たしているがフェーズ3ではさらに小さく抑える必要があり要検討である。

3.3 3セクターの水平エミッタンス増大

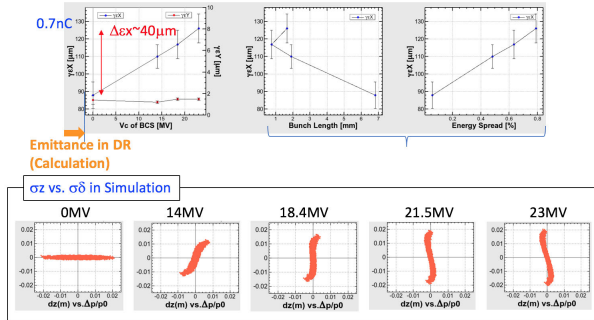


Figure 8: The upper graphs show the measured horizontal emittances of the 0.7 nC beam by the wire scanners at Sector3. The horizontal axes represent the V_c of BCS, bunch lengths, and energy spreads corresponding to the V_c , in order from the left. The lower graphs show the distribution in the longitudinal phase space by simulations.

3セクターでのエミッタンス増大の原因を探るために、FCをスタンバイにして電荷量を0.7nCと低くした状態で、RTLのBCS加速位相を変えてエミッタンスを測定した。結果をFig.8に示す。BCSの V_c に相当するバンチ長、およびエネルギー広がり、トラッキング・シミュレーション（図の下段）により求めた。ここで、DRの出射ビームのバンチ長は設計値の6.6 mmとした。この値はDRのストリーク・カメラによる測定値とエラーの範囲内で一致している[10]。 V_c を低くするほど水平エミッタンスが小さくなることから、バンチ長が長くなる、またはエネルギー広がりが小さくなるとエミッタンスが小さくなるという相関がある。さらに、 V_c をOffにした状態で電荷量1.5 nCでのエミッタンスを測定した結果をTable 6にまとめる。3セクターに設置された4台のワイヤスキャナーでエミッタンスを測定した結果、電荷量が高い場合にエミッタンスが大きくなった。

Table 6: The Measured Emittances by Wire Scanners at Sector 3 at a Charge Amount of 0.7 nC and 1.5 nC

Charge [nC]	V_c [MV]	$\gamma\epsilon_x$ [μ m]	$\gamma\epsilon_y$ [μ m]
0.7	0	88 ± 7.6	1.4 ± 0.4
1.5	0	104 ± 7.4	3.7 ± 0.5

これらを説明する一因として、レジスティブ・ウォールおよびコヒーレント・シンクロトロン放射(CSR)について概算[11]を行った。レジスティブ・ウォールについては以下の式を、

$$\frac{Z_m^{\parallel}}{L} = \frac{Z_0 c / (\pi b^2 m)}{[1 + \text{sgn}(\omega)i](1 + \delta_{m0})bc\sqrt{\frac{\sigma_c Z_0 c}{2|\omega|}} - \frac{ib^2 \omega}{m+1} + \frac{imc^2}{\omega}}$$

CSRについては、以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} \frac{Z_m^{\parallel}}{L} &= \frac{1}{c} \int_0^{\infty} dz W_{\parallel}(z) e^{-ikz} \\ &= \frac{Z_0}{2\pi} \frac{e^{i\pi/6}}{3^{1/3}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \frac{k^{1/3}}{R^{2/3}} \end{aligned}$$

ここで、真空の特性インピーダンス(Z_0)=377 Ω 、偏向電磁石の曲率半径(R)=3.35 m、ビームパイプの高さ(b)=21 mm、バンチ長(σ_z)=1-7 mm、偏向電磁石内の軌道長(L)=0.7938 m、電荷量は1 nC、材質はSUS316Lとした。その結果、レジスティブ・ウォール、およびCSRによる水平エミッタンス増大は、それぞれ0.0012 μ m、および0.81 μ mとなり、Fig. 8に表れた V_c の変化によるエミッタンス増大の40 μ mよりかなり小さい値となった。しかし実際の粒子分布はきれいなガウシアンではなく、詳細にはトラッキング・シミュレーションが必要となる。また、3.2「水平分散の補正」で残った水平分散があるためにエネルギー広がりが大きくなるとエミッタンスが増大することに追加して、3セクターのトランスバース・ウェイクによって電荷量依存性が出てきた可能性も考えられる。さらに今後の課題として、DRでのビームサイズ測定[10]を行い、DRでの測定エミッタンスを考慮してエミッタンス増大を検討したい。

4. まとめ

2018年1月から開始したDRコミッショニングは、入出射調整を含めて順調に行われ、2018年7月のフェーズ2運転終了まで大きな問題なく稼働した。RTLのエミッタンス増大に関してはフェーズ2では問題にならなかったが、来たるフェーズ3の入射では早急に解決すべき事象である。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, “Achievements of KEKB”, PTEP 2013(2013)03A001 DOI: 10.1093/ptep/pts102.
- [2] M. Yoshida *et al.*, FROM06 “SuperKEKB 用 RF 電子銃のコミッショニング”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [3] M. Kikuchi *et al.*, TUPEB054 “Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, May. 23-28, 2010.
- [4] Y. Enomoto *et al.*, MOP063 “SuperKEKB 用フラックスコンセントレーターの開発”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [5] N. Iida *et al.*, THYA01 “Beam Dynamics in Positron Injector Systems for the Next Generation B-Factories”, Proceedings of IPAC’11, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011.
- [6] Y. Funakoshi *et al.*, MOOL02 “SuperKEKB のフェーズ1のビームコミッショニング”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016.
- [7] T. Kamitani *et al.*, MOOLP02 “SuperKEKB のフェーズ1における入射器とリングの現状”, Proceedings of

- the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016.
- [8] Y. Ohnishi *et al.*, WEOPL01 “SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッショニングの成果”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [9] N. Iida *et al.*, “Recent Progress of Wire Scanner Systems for the KEKB Injector LINAC and Beam Transport Lines”, Proceedings of IPAC2000, Vienna, Austria, pp. 1738-1740.
- [10] H. Ikeda *et al.*, WEP084 “SuperKEKB Phase-II でのダンピングリングビームモニターシステムの運転”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [11] A. Chao and M. Tigner, Handbook of Accelerator Physics and Engineering.