

ATF 加速器における研究開発の現状

ATF STATUS REPORT 2014

照沼 信浩^{#, A)}, ATF 国際コラボレーション
Nobuhiro Terunuma^{#, A)}, ATF International Collaboration
^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Accelerator Test Facility (ATF) in KEK is a research center for studies on issues concerning the injector, damping ring, and beam final-focus system for the ILC. ATF2 is a final-focus test beam line that aims to focus the low emittance beam from the ATF damping ring to a vertical size of about 37 nm and to demonstrate the nanometer level beam stability, using numerous advanced beam diagnostics and feedback tools. The beam size smaller than 44 nm at the ATF2 focal point was confirmed by June 2014 following the efforts to cure the multipole errors, wake field effects and the beam orbit stability. The equipment for the beam position stabilization in the nanometer level has been installed in July 2013. The studies both on a small beam toward the 37 nm beam and a nanometer position stabilization are continued.

1. はじめに

KEK における ATF (先端加速器試験装置) では、国際リニアコライダー(ILC)計画^[1]など将来の加速器で必要とされるビーム計測技術およびビーム制御技術の開発を行っている。ATF はマルチバンチビーム生成を行う photocathode RF gun、1.3GeV S-band Linac、damping ring、最終収束システム試験ビームライン(ATF2)^[2]から構成されている(Figure 1)。

ATF で行われている研究開発^[3]は多岐にわたる。その中でもここ数年は ATF2 におけるナノメートルビーム生成制御に関連する技術開発が主要なテーマとなっており、海外の研究機関から多くの研究者が実験に訪れている。この国際的な共同開発研究は、MoU に基づいて組織された国際コラボレーション体

制のもとで行われている^[4]。近年の訪問者数を Figure 2 に示す。ATF2 計画では設計から建設・運営に至るまで国際的に共同で行っている。建設期(2006~8)と commissioning 期(2009~10)には海外から多くの研究者が訪れて、分担した装置の立ち上げを精力的に進めていた。2011 年は震災による復旧で実験時間が少なかった影響が見て取れる。2012 年以降はビーム診断装置開発などが進み、研究の重心が ATF2 ナノメートルビーム調整技術開発にシフトしている。そのため多くの研究者はビーム運転に合わせて滞在しており、建設期ほど長期滞在はしていない。しかしながら、ビーム実験中は研究者が集中しており、以前にも増して精力的に研究活動が展開されている。

ATF の年間運転時間は約 22 週間である。2 週間のビーム運転と 1 週間の待機を繰り返しており、この

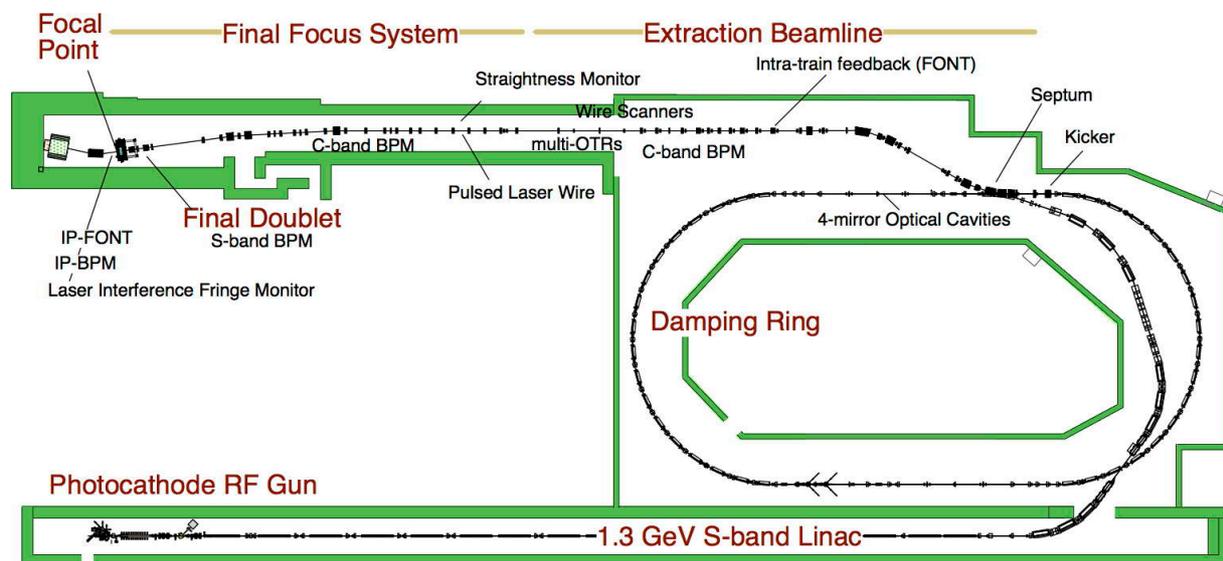


Figure 1: Layout of the ATF.

[#] nobuhiro.terunuma@kek.jp

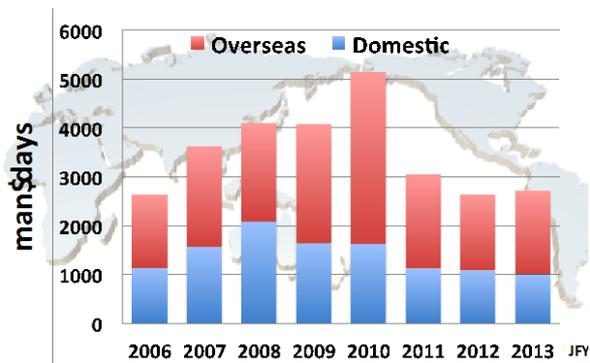


Figure 2: The numbers of visited researchers.

待機週に開発しているビーム診断装置の設置や改善調整を行っている。

2. 昨年からの研究開発の進展

現在、リニアコライダー最終収束(final focus)システムの技術開発プログラム(ATF2)が最優先事項である。ATF2 計画における目標は大きく分けて二つある。第一の目標は、垂直方向 37 nm の極小ビームの安定な達成であり、国内外の共同研究者の多くがこれに参加している。第二の目標はこの極小ビーム位置をナノメートルレベルで安定化することである。これらは ILC の設計ルミノシティ達成に重要な技術である。昨年度のビーム時間配分実績では、これら ATF2 に関係するものが全体の 80% を占めた。

2.1 (Goal-1) 垂直方向 37 nm の極小ビーム開発

ATF2 ビームライン(Figure 3)は ILC 最終収束ビームラインと同じ光学設計(energy scaled)に基づいている。energy spread (0.1%)や natural vertical chromaticity (~10000)、さらに電磁石の field error に対する許容度は ILC のものと同等である。最終四極電磁石から衝突点までの距離 L^* とビームエネルギーでスケールすると、ATF2 でのビームサイズ 37 nm は ILC での 6 nm に相当する。そのため、ATF2 に課せられた目標を達成することにより、ILC 最終収束技術を確立し実証することになると評価されており、国際的に高い関心を持たれている。

ILC では電子および陽電子ビームの衝突散乱をモニターすることでビームサイズの調整(ルミノシティ最適化)を行う事になる。ATF2 の場合は電子ビームのみであるため、垂直方向 37nm という極小ビームサイズの測定は、レーザー干渉縞と電子ビームとの逆コンプトン散乱を利用して行われる^[5](IPBSM, Figure 4, 5)。IPBSM の測定では、系統誤差はビームサイズを大きく算出する側に作用するので実際のビームはこれらより小さいと理解されている。

IPBSM は ATF2 ビームラインの focus point (ILC における衝突点 IP) に設置されている。レーザーの交差角で干渉縞のピッチが決まり、それに応じてビームサイズの測定範囲が決まる。ATF2 の IPBSM では



Figure 3: ATF2 beamline (Final Focus System).

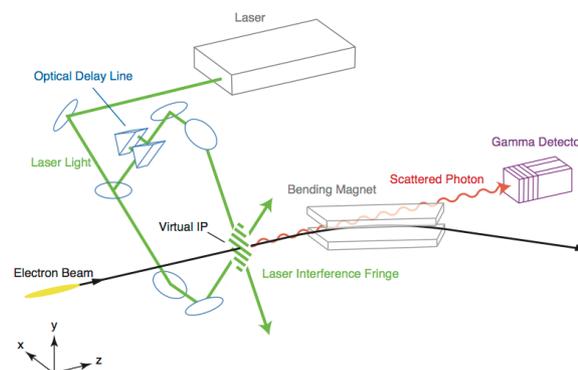


Figure 4: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor. ^[6]

3 種類の交差角モードが用意されており、設計上は 20 nm 程度までの測定範囲をカバーしている^[7]。このモニターで測定を開始できる最大のビームサイズは数ミクロンである。従って、そこに至るまでは 5 μm のカーボンワイヤモニターでビームサイズ測定を行いながらビーム調整を進める。通常、最初の交差角モードでの測定は 2 μm 程度から始めている。300 nm 程度以下のビームサイズに絞られると第二の交差角モードに移る。ここで調整が進み 100 nm 程度まで小さくなると最終の交差角モードに移ることになる。

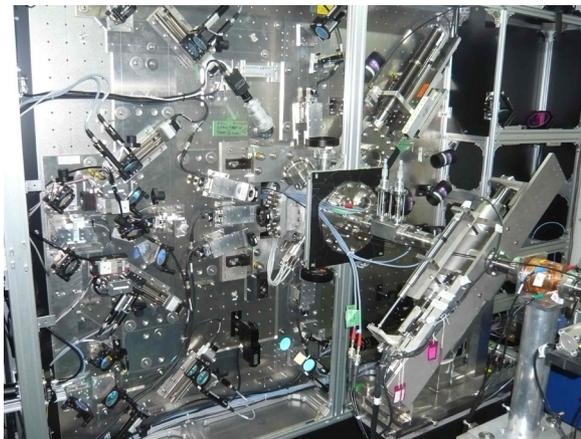


Figure 5: Beam size monitor at ATF2-IP.

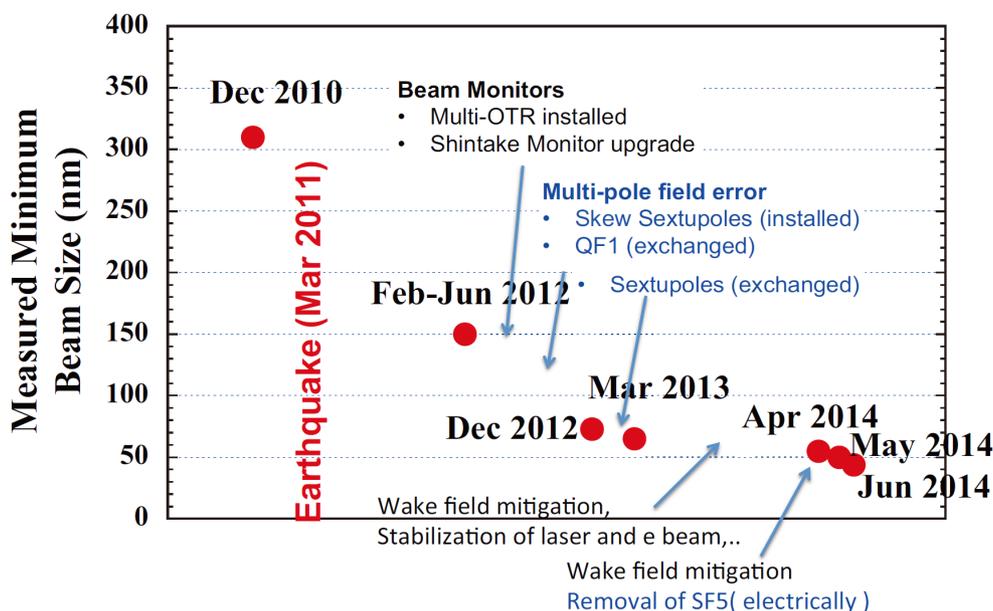


Figure 6: History of measured minimum beam size. [11]

ビームサイズが小さくなるほど、安定な測定が求められることとなり、IPBSM モニター自身の高度化を進めていく必要がある。この高度化のための開発と極小ビームの開発調整は相互に深く依存しあっている。

極小ビームの調整では chromatic aberration の補正が重要であり、6 極電磁石およびスキュー6 極電磁石を使って行われている [8]。これらのビーム調整の結果、昨年の学会時点において 65 nm に到達したことを確認した [9] (Figure 6)。ただし、ビームサイズに対する大きなビーム電流依存性が観測されたため、この値は当初想定していたビーム強度の $\sim 1/10$ に相当する 1×10^9 electrons/bunch で得られたものであった。このビーム電流依存性は主に Wakefield によるものと推測された。

昨年度の夏期停止後は 11 月にビーム運転が再開されたが、後述するナノメートル位置分解能 BPM システムの組込・立ち上げがあり、極小ビームを追求するビームライン調整は実質年明け 2014 年 1 月から再開された。

Wakefield の影響を調査するため、また Wakefield を打ち消す（低減する）ことを狙って、大きな source となるベローズや空洞型 BPM をリモートステージと共にビームラインに組込んでいた。それらの位置を変えて、IP でのビームサイズの振る舞いと電流依存性の調査を進めている。

ビーム電流依存性を低減するため、 β 値が大きく Wakefield の影響が大きいと推測される最終収束ビームライン部に対して真空チェンバーの改善対策を順次行った。計算コードによる Wakefield の評価をもとに、ベローズや排気ポートのシールド強化、チェンバー内面の段差軽減などを進めてきたが、ビームサイズモニターへのバックグラウンドなど細部については改善が見られたもののビーム電流依存性に対

する効果は限定的であった。

本年度 4 月からは最終収束系の更に上流にあたる β 値が低いエリアに範囲を広げ、Wire scanner, Screen monitor 類を順次取り外すなどして効果を調べた。その結果、エミッタンス測定に用いている OTR monitor を垂直方向に 6 mm 程（ビームパイプ直径の 1/4）動かすとビーム電流依存性が低減されることが確認された。現在、この OTR monitor の再評価と改善への検討を進めているところである。

Wakefield に係わる調査・対策と平行して、ビームサイズ測定の安定化も進められた。これは電子ビームとレーザー干渉縞の衝突の安定化である。レーザーについては発振器の調整と衝突点での干渉縞の傾き調整を行っている。電子ビーム軌道については、最終収束系の上流に空芯コイルの補正磁石を設置し、下流の高分解能空洞型ビーム位置モニター（分解能 25nm）との組み合わせによる software feedback を導入した。これらによりビーム調整における再現性が改善された。

上記の対策を進めてきた結果、昨年の学会時点で得られていたビームサイズ 65 nm は、本年 5 月には 55 nm、さらに 6 月には 44 nm まで絞られていることが確認された。Figure 7 にこの測定結果を示す。ビーム調整後に連続して測定した 10 回の分布である。これらの成果は、IPAC'14 および ICHEP'14 で報告されている [10][11]。

2.2 (Goal-2) ナノメートルでのビーム位置制御

ILC において電子・陽電子ビームの衝突を維持するために極小ビームの位置を nm レベルで安定化させることが重要である。安定化の目標はビームサイズの 1/3 である 2 nm を想定している。ILC のビームは 1 ms あり、最もバンチ数が多いオプションで、約

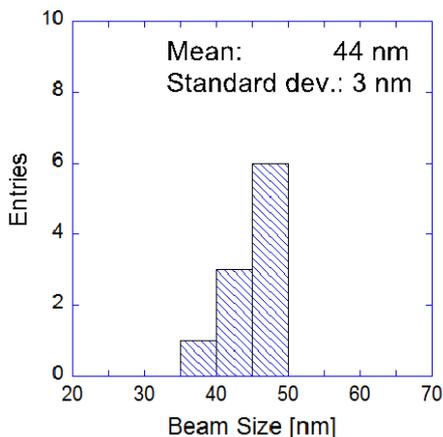


Figure 7: Distribution of the measured beam size of 10 successive scans on June 12, 2014^[11].

2600 個のバンチが 366 ns 間隔で衝突点に送られてくる。床振動などビームを乱す要因はこれに比べてゆっくりであり、バンチ列はコヒーレントに振動していると見なせる。そこで先頭のバンチから位置情報を引き出し、後続のバンチ群の位置を補正する Intra-train feedback^[12]技術(FONT)の開発を Oxford 大学と共に進めている。

ATF の取り出しビームラインに 2 台の stripline kicker と 3 台の stripline BPM が設置され、高速 digital feedback system に接続されている。ここでダンピングリングから取り出される 154 ns 間隔の 3-bunch beam を使い、応答速度 133 ns、ビーム位置ジッターを 1/3 の 0.8 μm まで低減させることに成功している (2012 年)。これを ATF2 の仮想衝突点において構築し、実際に nanometer レベルでの安定化技術開発を行うのが ATF2 の Goal-2 である。

ATF2 仮想衝突点に於ける intra-train feedback に新たに必要となるのは 2 nm 分解能を持つ multi-bunch 対応の Low-Q 型 Cavity BPM である。この BPM とその readout 回路の製作を Kyongpook 国立大学 (韓国) と共に進めている。昨年までに行われた回路の開発では、Proto-type BPM との組み合わせではあるが、5 nm 程度の分解能があるとの評価になっている^[13]。開発の場は仮想衝突点に移ることにより、数 10 nm の極小ビームを利用した Low-Q 型 Cavity BPM システムの開発が始まる。現在の readout 回路において、位置分解能 2 nm の高感度設定では BPM のダイナミックレンジが 5 μm と小さい。Attenuator を用いて感度を下げれば、この範囲を拡大することは可能である。

仮想衝突点への組込みは 2013 年の夏期停止期間中に行われた (Figure 8)。Low-Q 型 Cavity BPM が合計 3 台組み込まれ、配置の制限からそのうち 2 台が一体ものとして、残り 1 台が単独でそれぞれ位置調整用ピエゾステージ (可動範囲+150 μm) の上に取り付けられた。このステージで相対位置調整や感度補正を行う。これらを収納する真空チェンバーは再製作となり、BPM ステージと一体で LAL (フランス)

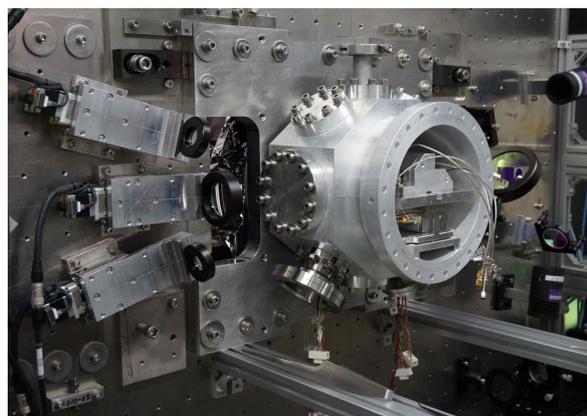


Figure 8: ATF2 IP. Cavity BPM were installed in the vacuum chamber. Closed flanges will be replaced by the viewports for lasers.

が担当した。

2013 年 11 月から 6 月中旬までのビーム運転において、BPM のアライメント、信号処理回路の試験が行われた。初期の段階で一体化されている BPM 2 台間での相対的中心位置と垂直度に大きなズレがあることが浮上した。これは 2 nm 分解能評価試験に問題を生じてしまう。計測は読み出し回路系の commissioning 状況に強く依存するため、状況を見ながら試験を繰り返してきた結果、現在のところ ~80 μm 、~1 mrad 程度と見積もられている。BPM の加工において相対的基準の指定が欠けていたことが分かっていることもあり、現在 KNU で再製作中である。10 月の運転再開前の入れ替えを計画している。

一方、BPM readout 回路の試験では、BPM の相対的位置や傾きとは別に単独の BPM を用いて開発を進めることができる。Readout 回路の出力を Intra-train feedback 回路に入力してシステムの確認を進めている。暫定的ではあるが実際にビームに対する feedback loop を構築して応答試験も始められている。

Figure 9 は仮想衝突点(IP)の真空チェンバーに納める前の Cavity BPM である。BPM が IP を挟むように

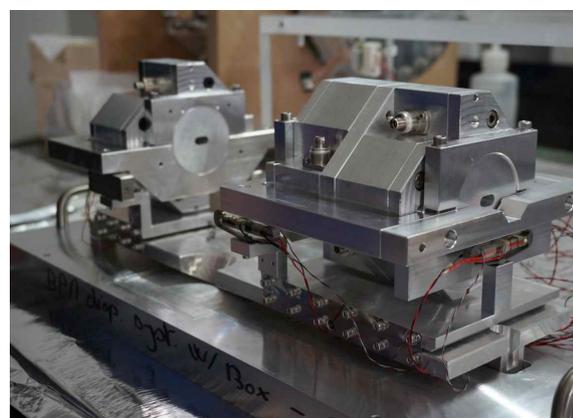


Figure 9: Cavity BPM on piezo mover.

上流に 2 つ（手前、一体化されている）と下流に 1 つ配置され、それぞれが piezo mover の上に置かれている。このうち任意の BPM 2 台でビーム軌道を割り出し、残りの BPM の分解能評価を行う。

2.3 ATF2 以外でのビームサイズモニター開発

ダンピングリングでのエミッタンス測定は laser wire, X-SR monitor, SR interferometer などのビームサイズモニターで行われてきた。ここ数年は real time でビーム調整に使える X-SR が主に用いられている。現在 ATF2 で必要とされるエミッタンス（垂直方向で 10 pm 程度）は比較的容易に調整されている。しかしながら、2 pm の低エミッタンスビームという開発目標があり、そのためにはレーザーと電子ビームの直接散乱を利用する laser wire での確認が必要となる。10 年ほど前からリングに設置されていた laser wire は 2-mirror system であり、調整には熟練した経験が必要で、近年ではほとんど運用されていなかった。一方、高輝度 γ 線生成研究において 4-mirror system が開発され高い安定性が示されている。そこでリングの laser wire も 4-mirror system として再設計されることとなり (Figure 10^[14])、本年 6 月にビーム試験にてコンプトン信号を確認するまで進んでいる。今後は夏期停止期間中にレーザーおよび光共振器の調整を行い、以前より強い信号の下で安定なビームサイズ測定が実現されると期待している。

一方、ATF2 ビームラインでは、Momentum spread を測定するためにターゲットに YAG:Ce を用いた高精度スクリーンモニターの開発が行われている^[15]。ビーム試験の結果、計測されたビームサイズは 7 μm であり、これはレンズの分解能で制限されたことが理解されている。既に ATF2 での測定に必要な精度が十分得られることが確認されており、今後はレンズ系の改善などから更なる高精度化が期待される。

3. まとめ

先端試験加速器 ATF では将来の加速器で必要とされるビーム計測技術およびビーム制御技術の開発を行っている。現在は ILC 最終収束システムの技術開発を目標とした ATF2 計画に集中して研究開発が進められており、国内外の研究機関から多くの共同研究者が訪れている。

ATF2 における第一の目標である垂直方向ビームサイズ 37 nm の極小ビームの実現では、Wakefield 対策、ビームの安定化およびレーザー干渉縞型ビームサイズモニターの安定化などを進めてきた結果、昨年同時期に達成されていた垂直方向ビームサイズ 65 nm をさらに絞りこみ、現在までに 44 nm に到達している。強いビーム電流依存性の問題では、継続して調査・対策を行っていくことになる。

第二の目標であるナノメートルレベルでのビーム位置制御技術の開発のために、昨年夏には ATF2 仮想衝突点に新たに Low-Q 型 Cavity BPM を位置制御システムと共に導入した。システムの commissioning を通して明らかにされた問題点の改善を行いながら、

ナノメートルレベルでの Intra-train feedback のビーム試験を進めていきたい。

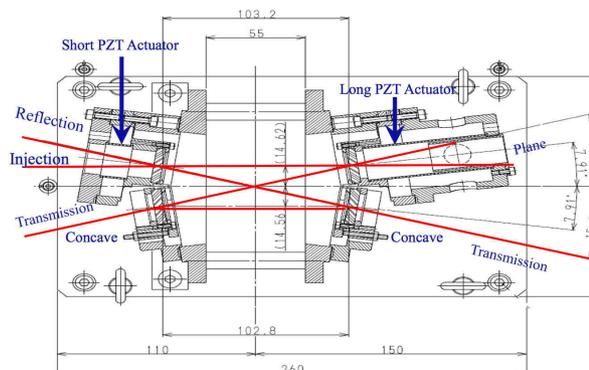


Figure 10: New 4-mirror optical cavity for the DR. An electron beam goes from top to bottom and the collision point is middle of the two concave mirrors.

参考文献

- [1] ILC RDR, ILC-REPORT-2007-001.
- [2] P. Bambade et al., Phys. Rev. ST-AB 13, 042801 (2010).
- [3] N. Terunuma et al., Proceedings of PAC11, NY (2011).
- [4] <http://atf.kek.jp/wiki/bin/view/Main/ATFIntroduction>
- [5] T. Shintake, NIM A 311, 455 (1992).
- [6] Y. Yamaguchi, Master thesis at Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2010.
- [7] T. Suehara et al., NIM A 616, 1 (2010).
- [8] T. Okugi et al., PRST-AB 17, 023501 (2014).
- [9] G. White et al., Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- [10] K. Kubo, Proceedings of IPAC'14, WEZA01 (2014).
- [11] S. Kuroda, to be published on the Proceedings of ICHEP'14 (2014).
- [12] P. Burrows et al., Proceedings of IPAC'14, TUPME009 (2014).
- [13] Y. I. Kim, et al., <http://arxiv.org/abs/1311.4283>, 2014 JINST 9 P02007
- [14] A. Rawankar, 加速器学会 2013, SAP103.
- [15] T. Naito, 本加速器学会, SAOM07.