

## 先端加速器試験施設 (ATF) の現状

### STATUS REPORT OF THE ACCELERATOR TEST FACILITY

照沼信浩<sup>#, A)</sup>, ATF 国際コラボレーション  
Nobuhiro Terunuma<sup>#, A)</sup>, ATF International Collaboration  
<sup>A)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Accelerator Test Facility (ATF) at 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. A study of the beam position stabilization in nanometer level has been conducted at the ATF2 focal point. It reduces the beam position jitter about 1/5. These activities are conducted under the framework of the international collaboration.

#### 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<sup>[1]</sup> 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、1.3 GeV S-band Linac、damping ring、最終収束システム試験ビームライン (ATF2)<sup>[2]</sup> から構成されている (Figure 1)。

ATF で行われている研究開発<sup>[3]</sup> 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、海外の大学および研究機関から非常に多くの研究者が ATF を訪れている。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<sup>[4]</sup>。実験のために ATF に滞在した研究者数を 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来た。建設および commissioning 期 (2006~10) には海外から多くの研究者が参加し、担当したビーム診断装置を精力的に立ち上げていた。2011 以降は診断装置の運用が軌道に乗り、ビーム光学技術開発に研究の重心がシフトしてきた。ATF2 でのナノメートルビーム技術開発がその中心となっている。加速器技術開発のための装置導入やその改善を行う時間が必要であり、ほぼ 2 週間のビーム運転期間とそれに続く 1 週間の保守期間を繰り返して運営を行った。参加者の約 6 割は海外研究機関の研究者であり、その多くはビーム運転計画に合わせて滞在している。昨年度のビーム運転期間は、電力料金の高騰の影響で従来の 2/3 と短縮せざるを得なかったが、海外参加者の関心はますます高く、例年並みの訪問者数まで達していた。

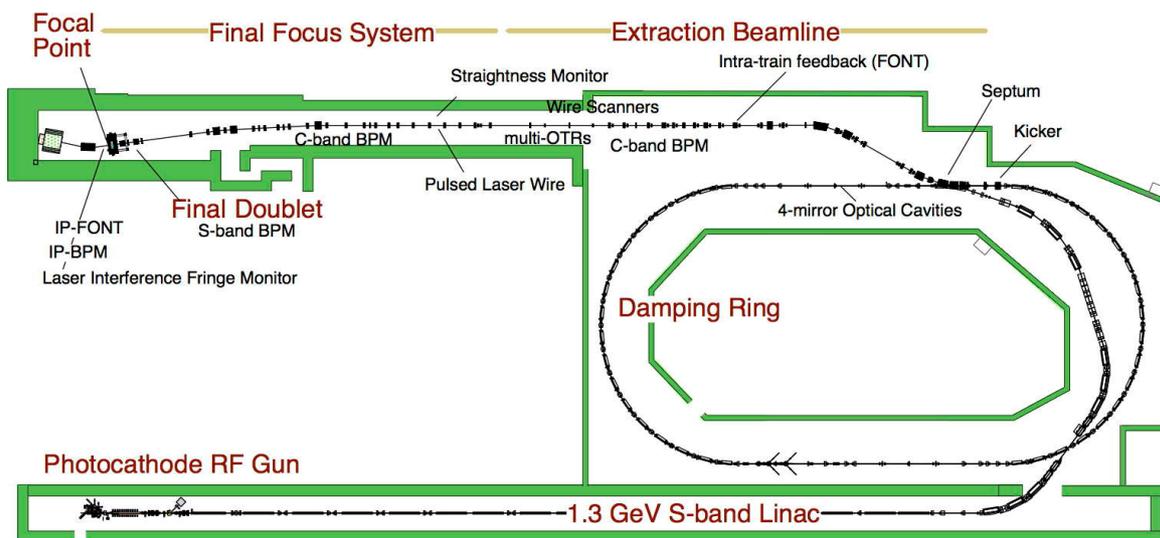


Figure 1: Layout of the ATF.

<sup>#</sup> nobuhiro.terunuma@kek.jp

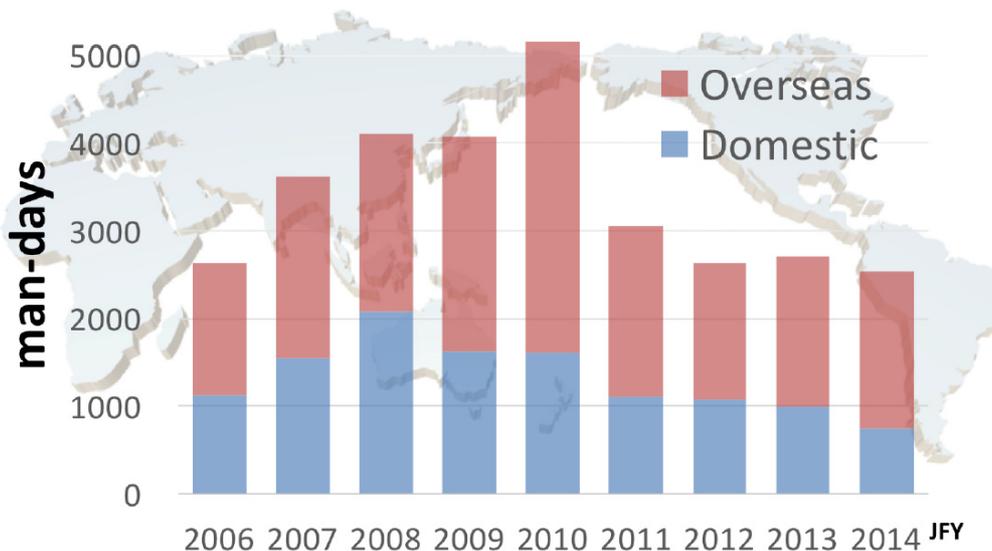


Figure 2: Number of visited researchers.

## 2. ナノメートルビーム技術開発

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 ILC 衝突点に相当する場所での垂直方向 37 nm の極小ビームの安定した実現である。第二の目標はこの極小ビームの位置をナノメートルレベルで維持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上、重要な技術である。

### 2.1 第一の目標：垂直 37 nm の極小ビーム開発

ATF2 ビームラインは 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、ILC での設計値である垂直方向ビームサイズ 6 nm は、ATF2 において 37 nm に相当する。これを実現することで、ILC 最終収束技術の実証を行い、また、実証試験を通じて更なる設計の高度化へと進展することを狙う。そのため、この極小ビーム開発は国際的に関心が高く、その達成が期待されている。

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、ナノメートルへのビームサイズ調整(ルミノシティ最適化)を行うことになる。しかしながら ATF は電子ビームのみの加速器であり陽電子との散乱を利用することはできない。また、37 nm の測定は通常ワイヤーモニターでは不可能である。レーザーワイヤーモニターであってもレーザーを 1  $\mu\text{m}$  以下まで絞ることは至難の業であり、ましてや 37 nm には遠く及ばない。そのため ATF2

における極小ビームサイズの調整は、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た測定を通して行われる<sup>[5]</sup>(IPBSM, Figure 3,4)。

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 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<sup>[7]</sup>。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  $\mu\text{m}$  である。数 10 nm へのビームサイズ調整は以下のステップを踏むことになる。まず、ビームライン立ち上げの状態からは、5  $\mu\text{m}$  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 2  $\mu\text{m}$  程度までビームを絞り込む。続いて、IPBSM での最初の交差角モードを用いて 300 nm 程度以下まで追い込む。ここで第二の交差角モードに移り、さらに 100 nm 程度以下までビーム調整を進める。そして最終の交差

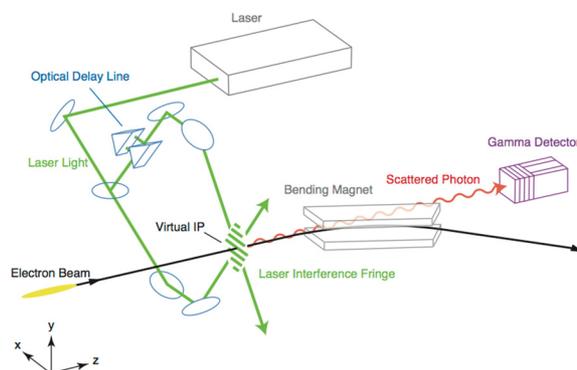


Figure 3: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor<sup>[6]</sup>.



Figure 4: Beam size monitor at ATF2-IP.

角モードに切り替えて数 10 nm 台のビームサイズ調整を行う。調整の条件によってはビームサイズが最終モードの測定範囲を超えて大きくなることもある。その場合、再び第二のモードに戻ることになる。ビームサイズが小さくなればなるほど、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。この高度化とビームサイズの極小化は相互に深く依存しあっており、一歩一歩進めて行くことになる。

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 [8,9]。これらのビーム調整の結果、2012 年に初めて 100 nm の壁を越えた (Figure 5)。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  $1 \times 10^9$  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。

ビーム電流依存性を低減するため、 $\beta$  値が大きく Wakefield の影響が大きいと推測される場所での真空チャンバーの形状改善を順次行った。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、チャンバー内面の段差軽減などを行った。また、積極的に Wakefield の影響を調査すること、また打ち消す (低減する) ことを狙って、大きな wakefield source となるベローズや空洞型 BPM など大きな内部構造をもつ機器をリモートステージと共にビームラインに組込んでいく。それらの位置を変えて、ATF2 仮想衝突点(IP)におけるビームサイズの電流依存性を調査するなど様々な観点から研究を進めている。

現在までに、エミッタンス測定に用いている Optical Transition Radiation(OTR) monitor が予想以上に大きく影響していたことが分かっている。ハード的な形状改善対策を進めると共に wakefield の電場計算による評価を行っている。

これらの対策・評価を進めてきた結果、昨年 6 月には 44 nm までビームを絞ることに成功した。目標に近いところまで到達しており、現 ILC 最終収束シ

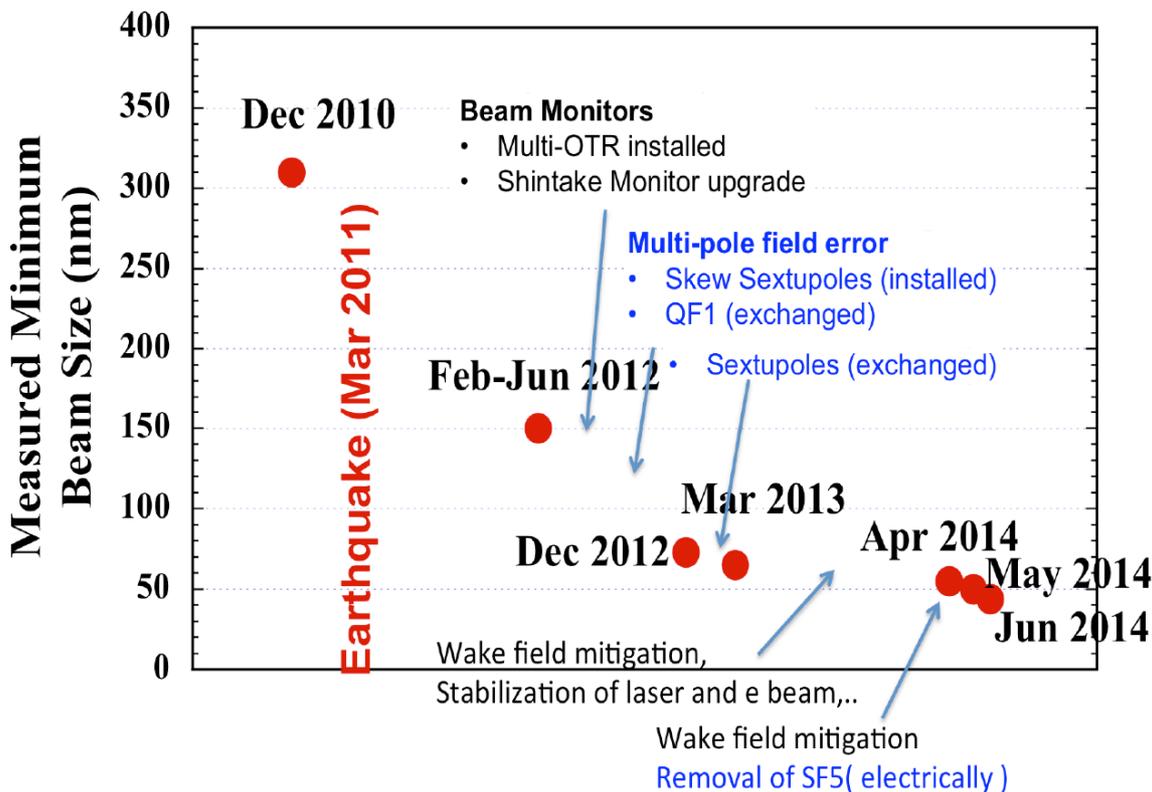


Figure 5: History of measured minimum beam size.

システムの設計性能を実証しているものと考えている。なお、ILCにおけるwakefieldの影響であるが、ILCではエネルギーが高いこともあり、ATF2での $1 \times 10^9$  electrons/bunchは、ILCでの $2 \times 10^{10}$ 程度に相当する。これはすでにILC設計ビーム強度でありwakefieldの影響は問題にはならない。

これら極小ビームサイズの成果は、IPAC'14およびICHEP'14の国際会議で報告されている<sup>[10][11]</sup>。また、本学会において奥木が詳細な報告を行う<sup>[12]</sup>。

## 2.2 第二の目標：ナノメートルでのビーム位置制御

ILCの電子ビームと陽電子ビームは、それぞれ約10 kmに及ぶ加速器ビームラインを通ってくる。それらは地盤振動や加速器機器の変動を受ける。衝突点での電子・陽電子ビームの衝突を維持するためには、これら極小ビームの位置を数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の時間幅での多バンチであり、最もバンチ数が多いオプションでは約2600個のバンチが366 ns間隔で衝突点に送られてくる。地盤振動などビームを乱す要因となる周期はこれに比べてゆっくりであり、結果として1 msの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のズレ情報を引き出し、後続のバンチ群の位置ズレを補正するIntra-train feedback<sup>[13]</sup>技術(FONT)が提案され、Oxford大学を中心に開発が進められてきた。

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、最初のバンチでビーム位置を割り出し、そのズレから後続のバンチをキックして位置を補正する技術開発試験が行われた。応答速度133 ns、ビーム位置ジッターを1/3の0.8  $\mu\text{m}$ 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レベルの極小ビームでの安定化技術開発を行うのがATF2での第二目標である。実際のILCではnanometerレベルになっている衝突点近傍はVertex検出器などで占有されており、BPMは2mほど離れた場所に設置される。そこではマイクロンレベルのビームサイズであり、想定する位置分解能も同程度であるためstripline型BPMが用いられる。つまり、ILC衝突点ではnanometerレベルのビーム位置安定化を直接確認することはできない。安定化はルミノシティの維持という形で見ることになる。研究開発の段階では、nanometerレベルのビーム位置安定化を直接見ることが重要である。ATF2においては仮想衝突点(近傍)にBPMを設置することができるので、ここにintra-train feedbackを構築し、その結果を直接測定することを狙う(Figure 6)。

ATF2仮想衝突点に於けるintra-train feedbackに必要なものは2 nm分解能を持ちmulti-bunchでの信号分離が可能であるLow-Q型Cavity BPMである。

このBPMはブロックの組み合わせで製作され、位置調整用ピエゾステージと共に真空チャンバー内に設置される。位置分解能を評価するために合計3台のBPMが衝突点を挟むように組み込まれている。スペースの都合で、そのうち2台が一体化されており、

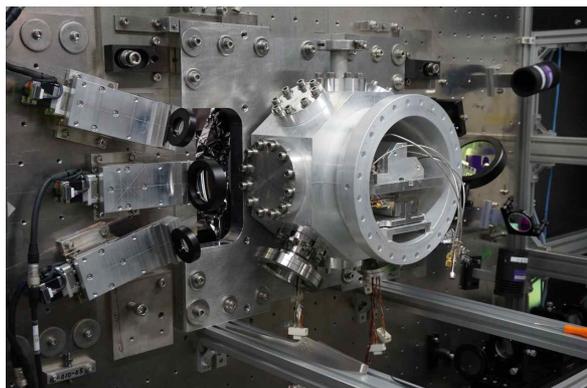


Figure 6: ATF2 IP. Cavity BPM were installed in the vacuum chamber. Closed flanges will be replaced by the viewports for lasers.



Figure 7: Cavity BPM on piezo mover.

残り1台が単独である。ピエゾステージの可動範囲は+150  $\mu\text{m}$ であり、相対位置調整や感度較正を行う(Figure 7)。

2013年に最初のBPMシステムがATF2仮想衝突点に導入された。ビーム試験により、一体化されているBPM 2台間での相対的中心ズレや垂直度など製作に起因する問題が見いだされたため、2014年に設計を見直したBPMを製作した。これを衝突点に組み込んでビーム評価試験を進めている。

位置分解能2 nmを実現するためのBPM信号処理回路の開発にはまだ時間が必要である。過去の試験空洞BPMでは5 nm程度<sup>[14]</sup>と評価されているが、現空洞BPMはLow-Q型で信号減衰が早いためである。前述したように2 nm位置分解能はATF固有の目的のためでありILCでは必要が無く問題とはならない。しかしながら、nanometerレベルでのビーム位置安定化の直接測定のため、また高度なBPM技術を開発するという観点からも開発を継続して行く。

前述したように、最終収束ビームライン上流(約

50 m) の取り出しラインには FONT システムが設置されている。これによる後続バンチの位置安定化が下流の仮想衝突点近傍でどの様に測定されるか試験が行われた。結果を Figure 8 に示す。使用した BPM は仮想衝突点から 10 cm 離れた位置にある。実際の仮想衝突点 (focal point) でのジッターを見ている訳ではなく、相対的な改善効果として見て頂きたい。この BPM の位置では Feedback 無しで約 410 nm のビーム位置ジッターがある。これを上流の FONT feedback を用いると 1/6 の 67 nm まで大きく改善している<sup>[15]</sup>。この BPM の読み出し位置分解能(47 nm)とほぼ同程度まで改善効果を確認できた。今後、読み出し回路の改善が進み、Feedback point を仮想衝突点近傍にすることで、数 nm のビーム位置安定化を実現する期待が持てる結果である。

### 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、44 nm を達成することができた。

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、ATF2 仮想衝突点に Low-Q 型 Cavity BPM を位置制御システムと共に導入した。BPM 読み出しシステムの改善を進めると共に、ナノメートルレベルでの Intra-train feedback のビーム試験を進めて行く。

### 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/twiki/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] T. Okugi, 本加速器学会.
- [13] P. Burrows et al., Proceedings of IPAC'14, TUPME009 (2014).
- [14] Y. I. Kim, et al., <http://arxiv.org/abs/1311.4283>, 2014 JINST 9 P02007
- [15] O. R. Blanco et al., to be published on the Proceedings of IPAC'15, MOPHA003 (2015).

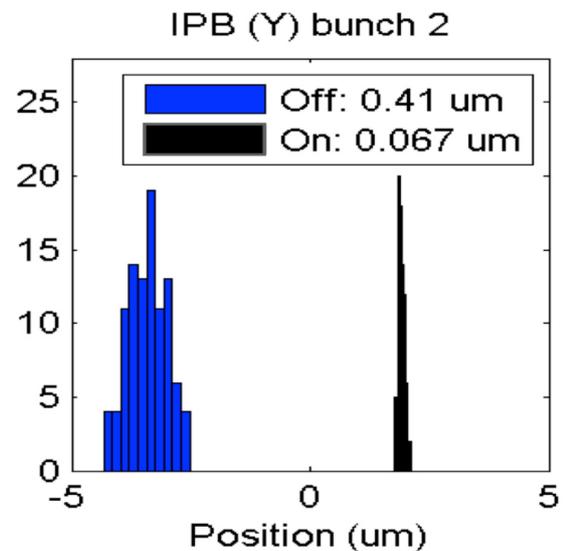


Figure 8: Beam position stability near the ATF2-focal point with and without the Intra-train feedback at the upstream of the ATF2 beamline.