

## ATF 加速器における研究開発の現状

### ATF STATUS REPORT 2012

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) in KEK is a research center for studies on issues concerning the injector, damping ring, and beam delivery system for the ILC. The ATF damping ring reduces the vertical emittance of the beam down to 4 pm·rad. 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 70 nm at the ATF2 focal point was confirmed by December 2012 following the efforts to cure the multipole errors, wake field effects and the repeatability of the beam size measurement. The equipments for the beam position stabilization in the nano meter level have 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<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、1.3GeV S-band Linac、低エミッタンスビームに変換するダンピングリング、さらにそのビームを利用し ILC 最終収束システムの開発試験を行う ATF2 ビームライン<sup>[2]</sup>から構成されている(Figure 1)。

ATF での多岐に渡る研究開発<sup>[3]</sup>には、MoU に基づいた国際コラボレーションが組織されており<sup>[4]</sup>、国内外の大学および研究機関から多くの研究者が精力的に参加している。

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、分担している装置の立ち上げを精力的に進めていた。2011 年は震災による停止とその後の復旧作業のためにビーム実験の時間こそ多くなかったが、復旧調整のために多くの研究者が訪れている。その後は分担機器に必要なメンテナンス作業も少なくなり、月単位での滞在からビーム運転がある週に集中して滞在する形態に移行しており、滞在日数の減少として現れている。ビーム運転期間に限ってみれば、大学院生の数も増えており、以前にも増して活発な共同研究が行われている。

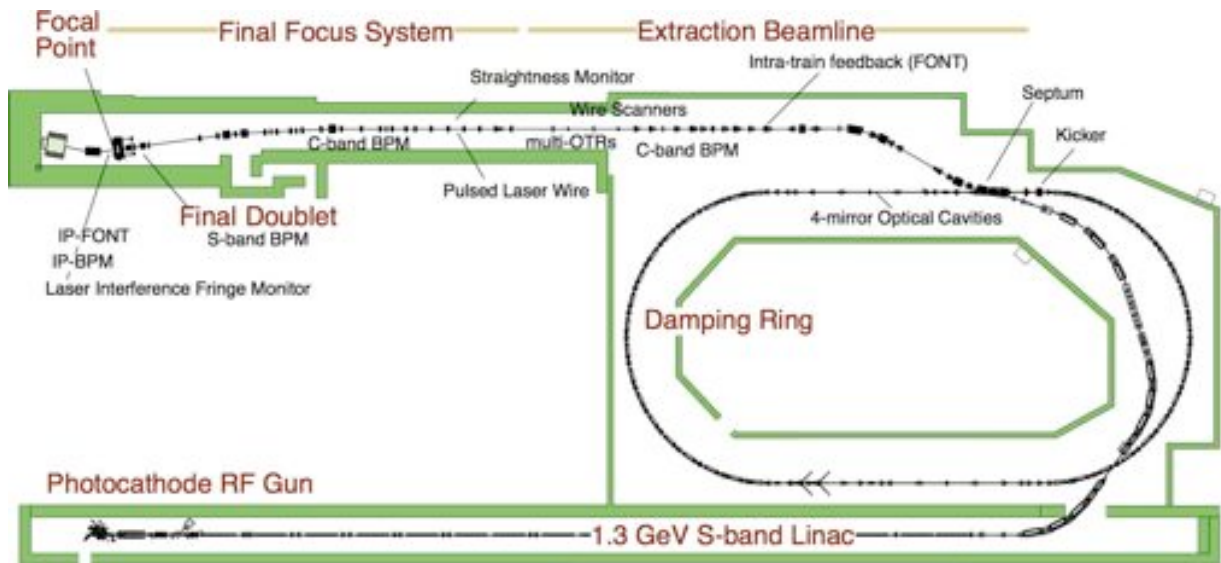


Figure 1: Layout of the ATF.

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

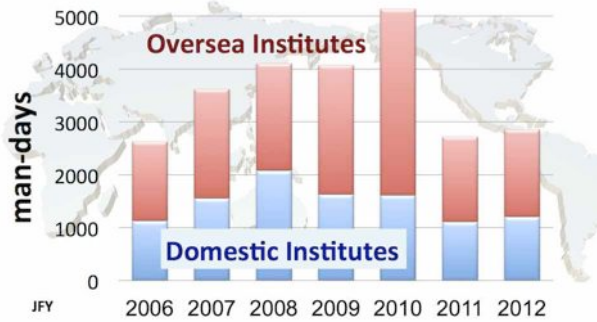


Figure 2: The numbers of visited researchers.



Figure 3: ATF2 beamline (Final Focus System).

## 2. R&D の進展

ATF で行われている研究開発は多種多様にわたる。中でも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)が最優先事項であり、海外からの参加者の多くがこれに参加している。ビーム時間は ATF2 に 50%、それ以外に 50% を基本として配分し、各 R&D の進捗状況に応じて再調整している。

### 2.1 垂直方向 37 nm の極小ビーム開発

ATF2 計画における第一の目標は、垂直方向 37 nm の極小ビームの達成である。ATF2 ビームラインは ILC 最終収束ビームラインと同じ設計(energy scaled)であり、ATF2 での 37 nm は ILC での 6 nm に相当する。

ATF2 での仮想衝突点 (IP) のビームサイズ測定は、レーザー干渉縞をとのコンプトン散乱を利用する (IPBSM, Figure 4)。干渉させるレーザーの交差角で干渉縞のピッチが決まり、それに従っ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ある。最初の交差角モードでの測定は 2  $\mu\text{m}$  程度から始まり、そこに至るまでは 5  $\mu\text{m}$  のカーボンワイヤによるビームサイズの測定・ビーム調整が行われる。第二の交差角モードでの測定に移るためには 300 nm 以下のビームサイズまで絞らなければならない。さらに最終の交差角モードに移るためには 90 nm に達しなければならない。ビームサイズモニターの commissioning と極小ビームの調整が互いに深く依存し状況を複雑にしていた。

こうした中で 2012 年 2 月に初めて第 2 のモードでの測定に移行、165 nm のビームサイズを確認した。昨年度の前半 (夏期停止前) は、このレベルでのビームの振る舞いから様々な Optics の検証を行った。高次磁場エラーの評価が進み、その対策を 2012 年の夏期停止期間中に行っている。また、それまでの交差角制御機構では、3 つのモードでのミラー調整が独立になっておらず、回転ステージの再現性から問題が生じやすいなど、結果的に交差角調整に時間がかかると言う問題があった。震災でさらにズレがひどくなっていたこともあり、回転ステージを廃止

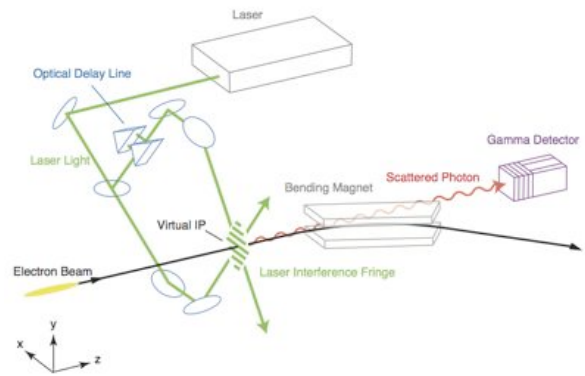


Figure 4: Schematic configuration of the nano-meter beam size monitor

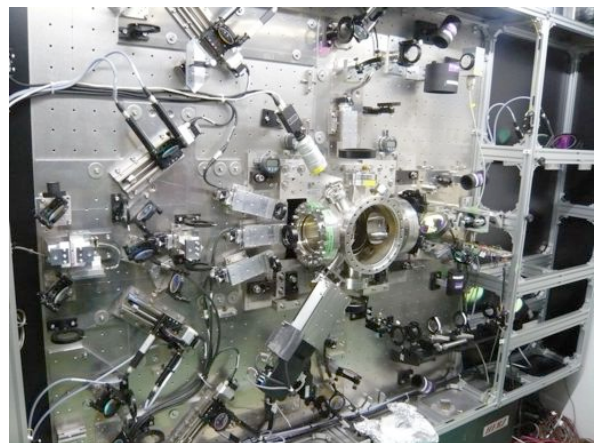


Figure 5: Beam size monitor at ATF2-IP

し直線ステージの組で交差角を制御する改造が行われた(Figure 5)。これらにより、11 月の運転再開後はビーム調整・測定での再現性が大きく改善され、ビームラインの理解がより深く進んだ。この中で、ビームサイズにおける強いビーム電流依存性が確認された。ビーム強度をそれまでの 1/5~1/10 に相当する  $1 \times 10^9$  electrons/bunch 程度に下げて調整を進めた結果、2012 年 12 月に初めて最終の交差モードでの

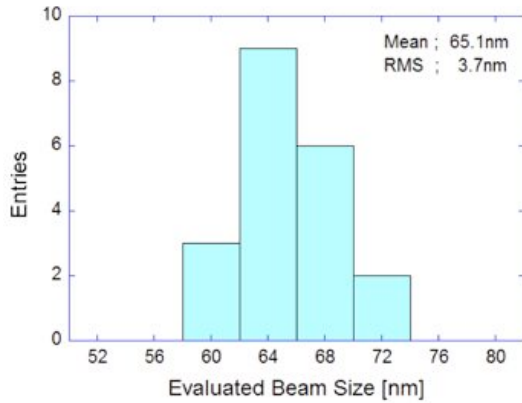


Figure 6: Evaluated beam size at the ATF2 IP.

コンプトン信号を検出し、垂直ビームサイズ 70 nm 程度以下であることが確認された。その後、ビーム電流依存性の調査(wakefield など)を進めている。2013年3月のrunで測定されたビームサイズの分布を Figure 6 に示す。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より小さいと理解されている。ビーム調整の詳細は久保氏の報告を参照されたい<sup>[5]</sup>。これらの極小ビーム研究開発に際して、リングから送られてくるビームの変動を小さく保つ努力が必要であった。環境温度に起因するリング周長の変化のため、エネルギーや軌道などが変わる。これをリングの周波数を調整することで低減している。これについては内藤氏の報告を参照されたい<sup>[6]</sup>。

## 2.2 ナノメートルでのビーム位置制御

ATF2 計画での第2の目標は極小ビームの位置を nm レベルで安定化させることである。ILC でのビームサイズの 1/3 である 2 nm を目標としている。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 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

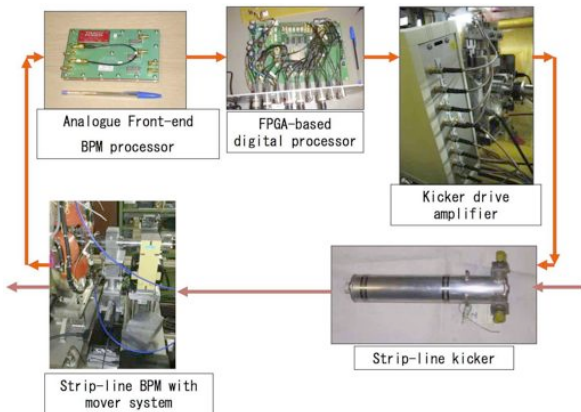


Figure 7: Configuration of the intra-train feedback.

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 技術(FONT)の開発が ATF を利用して進められている。

ATF では、ダンピングリングから 154 ns 間隔で取り出された3つのバンチを利用している。2012年6月までは取り出しビームラインに stripline kicker と stripline BPM の組み合わせによる feedback system (Figure 7)を構築して試験が行われてきた。最初のバンチ位置検出から第2バンチを補正するまでに 133 ns での応答を実現し、位置ジッターを 1/5 から 1/3 まで低減させることに成功している(Figure 8)。

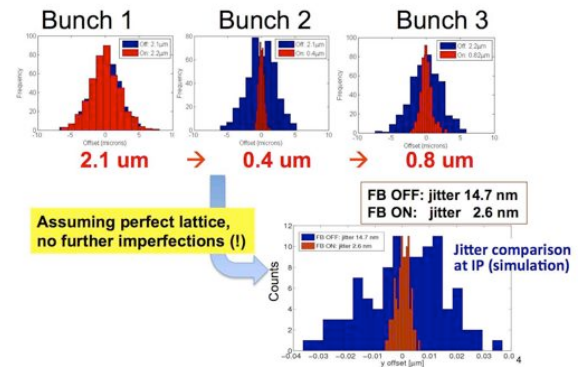


Figure 8: Position jitter suppression by FONT.

2012年11月からは開発の場所を仮想衝突点に移し、今後予定されている nm レベルでの実証実験のために”予備”試験を始めた。ATF での nm レベル制御のためには Cavity BPM を使う必要がある。設置されていた Cavity BPM は 1 台であり、分解能追求のために製作された初期型のもので 154 ns 間隔のバンチに対しては信号分離が十分でない。しかし予備試験として信号を feedback board に入力し、システムの理解を深めてきたところである。これは、2013年6月まで続けられた。

分解能 2 nm の多バンチ用 BPM とその readout 回路の開発は KNU (韓国) の分担で進められてきた。既に Low-Q 型の BPM は開発されており、これを使用して得られる実際のビーム信号を用いて高分解能



Figure 9: Cavity BPM on piezo mover

のための readout 回路の開発が進められた。現在、2 nm の感度を見込める状態にあるが、本実験を行いながら今後も開発が続くものと考えている。

ナノメートルでのビーム位置制御実験では、この BPM を 3 個使用する。2 個でビーム軌道を読み出し、残りの BPM の較正を行う。BPM の相対位置調整や感度補正などのために位置調整ステージも必要である。真空チェンバーも再製作となり、BPM サポート系と一体で LAL (フランス) が担当した。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。

開発された BPM 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  $\mu\text{m}$  と小さい。(Attenuator を用いて感度を下げればダイナミックレンジを大きく増やすことはできる)。piezo mover は 1 nm の位置制御で  $\pm 150 \mu\text{m}$  の動作範囲がある。BPM 信号を見ながらビームとのアライメントを追い込んで行くことが重要である。

先月 7 月に IP への組み込みが行われた。作業のためレーザー制御系を取り外し、新しい真空チェンバーを設置、その中に BPM システム挿入した (Figure 10)。真空気密試験及び piezo mover の動作試験も無事完了しており、現在は IPBSM レーザーの位置調整作業を行っている。

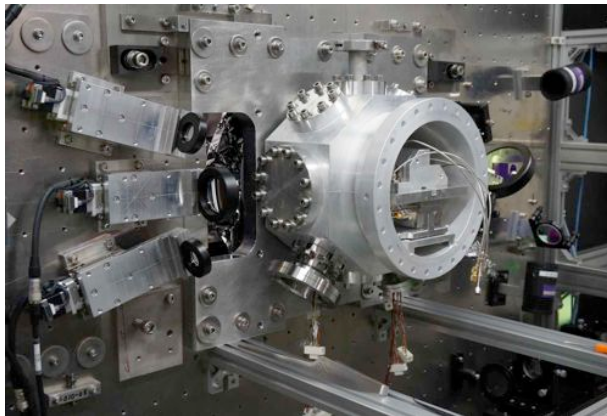


Figure 10: ATF2 IP. Cavity BPM were installed in the vacuum chamber. Closed flanges will be replaced by the viewports for lasers.

### 2.3 レーザー蓄積装置開発

偏極陽電子源開発のための偏極  $\gamma$  線の生成研究がダンピングリングで行われている。レーザー蓄積装置で光束の強度を高め、電子ビームと衝突させて偏極  $\gamma$  線を得る。2011 年秋にレーザー蓄積装置を 2-mirror optical cavity から 4-mirror によるものに変更した。これにより、レーザー蓄積のためのミラー制御の許容度が上がり、結果として高い蓄積率を安定に実現することに成功している。2012 年は電子ビームとの同期システムの高度化に集中して取り組んでおり、今年度その成果を期待したい。

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) へ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。偏極  $\gamma$  線研究における 4-mirror system の実用化を踏まえ laser wire も 4-mirror system として再設計 (Figure 11)されることとなり、2012 年に製作を完了している。今年の夏にリングへの導入を行う<sup>[7]</sup>。

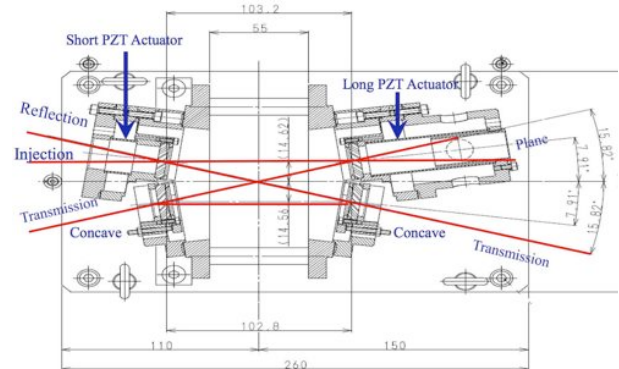


Figure 11: New 4-mirror optical cavity for the DR. An electron beam goes from top to bottom and the collision point is middle of the two concave mirrors.

### 3. まとめ

昨年は ATF2 計画の第一目標である 37 nm 極小ビームの実現に集中した年であった。高磁場エラーの対策、ビームサイズモニターの改善などの努力の結果、垂直方向ビームサイズは 65 nm 以下であることを確認できた。強いビーム電流依存性の問題は、新たな重要なテーマとして位置づけを行い、しっかりと原因を探求し対策していきたい。

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では、BPM、mover さらに feedback 回路などの試験が進み、それらを統合して ATF2 仮想衝突点に組み込みが進められている。目標達成には時間が必要と考えるが、今年の秋から立ち上げに大いに期待したい。

### 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] K. Kubo and T. Okugi, 本加速器学会, SAOTP1
- [6] T. Naito, 本加速器学会, SAP081
- [7] A. Rawankar, 本加速器学会, SAP103