

KEK 先端加速器施設(ATF)におけるナノビーム技術開発

DEVELOPMENT OF THE NANOMETER BEAM TECHNOLOGY AT THE ACCELERATOR TEST FACILITY

照沼信浩^{#, A,B)}, 久保浄^{A,B)}, 黒田茂^{A,B)}, 奥木敏行^{A,B)}, 内藤孝^{A)}, 福田将史^{A,B)}, アレクサンダー アリシエフ^{A,B)}, 荒木栄^{A)}, 森川祐^{A)}, 中村英滋^{A,B)}, 大森恒彦^{A)}, 倉田正和^{A)}, 阿部優樹^{B)}, ポポフ コンスタンティン^{B)}, ATF 国際コラボレーション^{C)}

Nobuhiro Terunuma^{#, A,B)}, Kiyoshi Kubo^{A,B)}, Shigeru Kuroda^{A,B)}, Toshiyuki Okugi^{A,B)}, Takashi Naito^{A)}, Masafumi Fukuda^{A,B)}, Alexander Aryshev^{A,B)}, Sakae Araki^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Eiji Nakamura^{A,B)}, Tsunehiko Omori^{A)}, Masakazu Kurata^{A)}, Yuki Abe^{B)}, Popov Konstantin^{B)}, and the ATF International Collaboration^{C)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

^{C)} <http://atf.kek.jp>

Abstract

At the Accelerator Technology Facility (ATF) of KEK, the technology development of the nanometer beam (nanobeam), which is targeting the colliding beam of the International Linear Collider (ILC), is being conducted by using the Final Focus System Test Beamline (ATF2). The goal is to realize an ultra-small beam of 37 nm, which corresponds to the colliding beam size of 7 nm (vertical) at the ILC, and to develop beam position control technology at the nanometer level. We have achieved a beam size of 41 nm in the vertical and have confirmed a fast position feedback technique that can stabilize the position at the nanometer level. In ATF2, we are also investigating the effect of Wakefield. The ATF2 (1.3 GeV) is a good facility for this research because it has a cavity type BPM with 20 nm position resolution and a laser interference fringe type beam size monitor to measure nanobeams. At ILC (125 GeV beam), the effect of the wakefield is evaluated to be limited. The research at ATF2 is important to improve the reliability of this evaluation and to pursue the stabilization and upgrading of the beam of ILC. In the autumn of last year, an international review committee was held to summarize the technological development to date, and the results were highly evaluated, and the development plan during the ILC preparation period and the upgrading and modification plan of the final focus beamline (ATF3 project) were supported. Although overseas collaborators are not able to visit Japan at present, domestic researchers are working on the technological development to prepare for the ATF3 project by pursuing further stabilization of the current nanobeam generation and measurement technologies.

1. はじめに

現在、国際リニアコライダー(International Linear Collider, ILC) [1]の実現に向けた検討が進められている。2020年8月には国際将来加速器委員会 ICFA が ILC の国際推進チーム(International Development Team, IDT)を立ち上げた。この IDT は ILC 計画の準備段階への第一歩として、日本の ILC 準備研究所(Pre-Lab)に向けた準備を任務としている。

KEK は ILC で必要となる加速器技術開発を進めるために、超伝導リニアック試験施設(STF)、空洞製造技術開発施設(CFF)、先端加速器試験施設(ATF)を建設し運用している。STF と CFF は超伝導加速技術開発を担い、ATF は ILC の衝突ビームとして必須となるナノメートル極小ビームを安定に実現するための技術開発を担っている。

ATF の加速器構成を Fig. 1 に示す。電子ビームは

光陰極型高周波電子銃により生成される。ここでは 178.5 MHz のレーザーを使用し、バンチ間隔 5.6 ns、パルスあたり最大 10 バンチ、バンチあたりの最大電子数 2×10^{10} 個の電子ビームが可能である。その後、電子ビームは S-band 線型加速器によって 1.3 GeV に加速され、ダンピングリングに送られる。ダンピングリングでは 3 パルス分のバンチ列(トレイン)を蓄積することが可能である。ここでビームは放射減衰により低エミッタンスビームに変換される。リングからのビーム取り出しには、300 ns の平坦部を持つパルスキッカーが用いられており、例えば 150 ns 間隔で蓄積された 3 バンチを一度に取り出し、下流のビームラインに送ることが可能である。加速器基準パルスの繰り返しは 3.125 Hz であり、ダンピングリング入射まではこれに従う。ダンピングリングからの取り出しは、リングに蓄積するバンチトレイン数で決まり、1トレインであれば 3.125 Hz、2トレインであればその半分となる。

ATF の最大の特徴は、ダンピングリングで生成される低エミッタンスビームを、先端的技術開発に利

[#]nobuhiro.terunuma@kek.jp

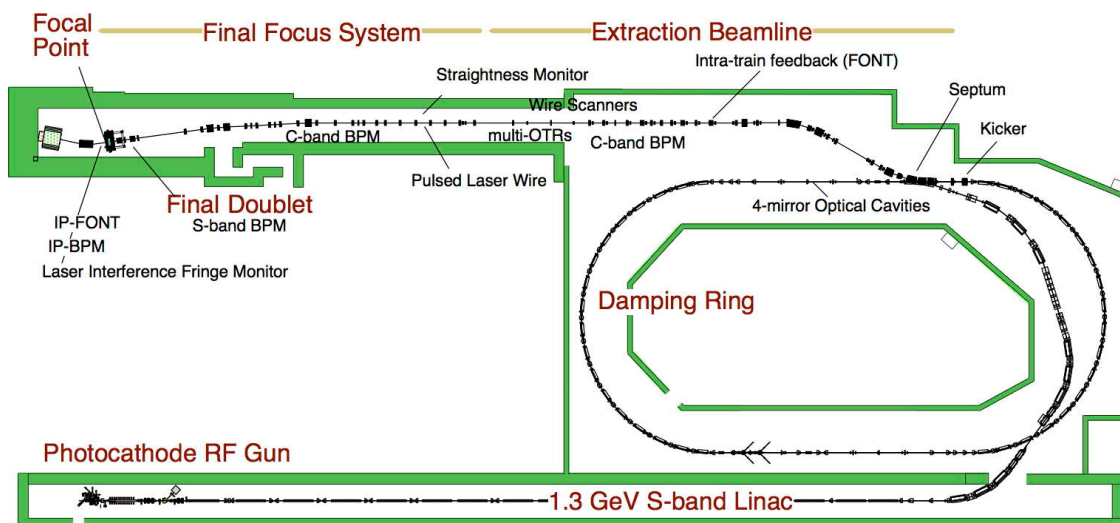


Figure 1: Layout of the ATF. 100m x 50m.



Figure 2: ATF2 beamline (Final Focus System).

用できることである。ここでは定常的に垂直方向 10 pm 程度のエミッタンスが得られている。このビームを用いて様々なビーム診断装置の開発が進められてきた。

ダンピングリング下流にはビーム最終収束システム (Final Focus System)がある。この最終収束システムに、ダンピングリングで得られる低エミッタンスビームを適用することで、ILC に必要なナノメートル極小ビーム技術開発が実施できる。この特殊なビームラインは、リニアコライダーのビーム技術開発を国際的に協力して実施することを狙い建設された。2005 年に協定書に基づく ATF 国際コラボレーションが立ち上がり、最終収束試験ビームラインの設計・建設が行われた[2]。ATF の Phase-2 としての計画であり、ATF2 と呼ばれている。建設にあたり、海外の研究機関は電磁石や空洞型ビーム位置モニターなどの機器を In-kind 貢献として分担している。この ATF2 ビームラインの運用は 2009 年に始まった[3]。

2. ナノメートルビーム技術開発

ILC の設計ルミノシティを実現するためには、

多バンチ加速を実現する超伝導高周波加速技術と衝突点でナノメートルに絞り込む極小ビーム技術が必須である。極小ビーム技術開発では、1990 年代に SLAC で Global Chromaticity Correction という収差補正方法によるビーム最終収束システムの試験(Final Focus Test Beam, FFTB)が行われ、垂直方向 70 nm のビームが確認されていた[4]。現在の ILC 設計では当時とは異なる Local Chromaticity Correction 方式が採用されている。この方式では Global 方式と比べてビームライン長を約 1/3 の 700 m に短縮できるなど大きなメリットがある。ATF2 はこの ILC の最終収束システムを基に設計された (Fig. 2)。

ATF2 計画には二つの重要な技術開発目標がある。一つは前述したように ILC での衝突ビームサイズを実現するためのビーム最終収束技術、もう一つはその極小ビームを衝突点で安定に衝突させるために必要なナノメートルレベルでの位置制御技術である。

2.1 ビーム最終収束技術開発

ATF2 最終収束試験ビームラインで目指す極小ビームサイズは垂直方向 37 nm である。これは ILC 250 GeV での設計値 (垂直方向ビームサイズ 7 nm)

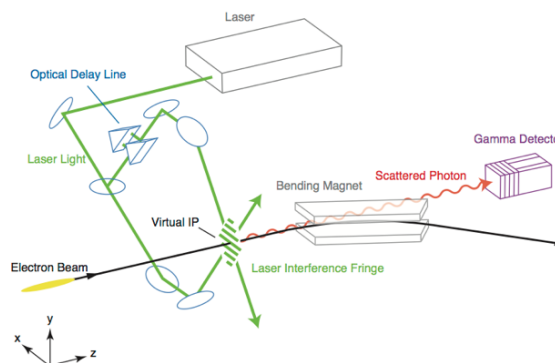


Figure 3: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor at ATF2.

に対応する。この極小ビームを ATF2 で実現することで、ILC 最終収束技術の実証し、更なる高度化への知見を得ることが ATF2 での第一の目標である。

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。しかしながら ATF は電子ビームのみの加速器であり、この方法は使えない。直接、ナノメートルレベルの電子ビームサイズを測ることが必要となる。それが可能となるのは同様の FFTB 実験 (SLAC, 1990 年代) のために開発されたレーザー干渉縞型ビームサイズモニター [5] のみである。

ATF2 のレーザー干渉縞型ビームサイズモニターは、最終収束系の focus point (ILC における衝突点 IP に対応) に設置されており、IP Beam Size Monitor, IPBSM と呼ばれている (Fig. 3)。電子ビームに対してレーザー干渉縞を動かし、干渉縞の光子と電子ビームの逆コンプトン散乱で生じる γ 線数の変化 (Modulation) を計測する。従って、測定には多数のビームショットが必要となり、レーザーや電子ビームの位置など様々なふらつきの影響も含んだ結果として計測される。そのため得られたビームサイズは実際のビームよりも大きくなり、結果、上限値として扱うべきものである。

IPBSM ではレーザーの干渉縞をいわば“ものさし”として使う。干渉縞のピッチはレーザーの交差角で決まり、それに応じてビームサイズの測定範囲が決まる。ATF では 3 段階の交差角モードを用いて数ミクロンから 20 nm 程度までの測定範囲をカバーしている (Fig. 4) [6]。

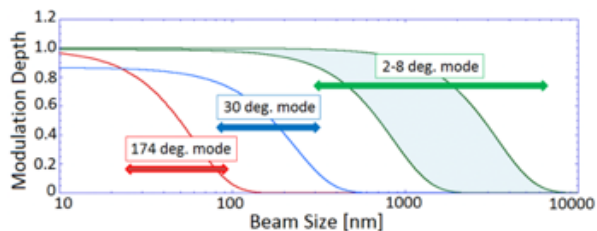


Figure 4: Range of the beam size measurement, IPBSM.

極小ビームへの絞り込み調整でのビームサイズ測定は、次の手順を踏む

- 1) ビームラインを立ち上げ、最初にビームを通す場合では、通常、数 μm 程度のビームサイズであり、IPBSM の測定範囲外である。そのため ATF2 focal point にはワイヤー径 $5 \mu\text{m}$ の挿入式 Carbon wire scanner が組み込まれており、これを用いて測定限界 $2 \mu\text{m}$ 程度までビームを絞り込む。
- 2) 続いて、IPBSM を用いたビームサイズ測定に切り替え、交差角 ($2^\circ \sim 8^\circ$) モードを用いて 300 nm 程度まで追い込む。
- 3) 次に第二の交差角 30° モードに移り、さらに 100

nm 程度までビーム調整を進める。

- 4) 最後に交差角 174° モードに切り替え、目標である 37 nm を目指したビームサイズ調整を行う。

極小ビームの調整では chromatic aberration の補正が重要であり、六極電磁石およびスキュー六極電磁石が使われる [7,8]。様々なビーム調整ノブを適用しながら極小ビームへと追い込んでいく。2012 年に初めて 100 nm の壁を越え、2014 年には FFTB 実験の 70 nm を下回る 44 nm までビームを絞ることに成功した。さらに、2016 年には次節で述べるビーム位置フィードバックを適用し、世界最小となる 41 nm を確認するに至った (Fig. 5)。

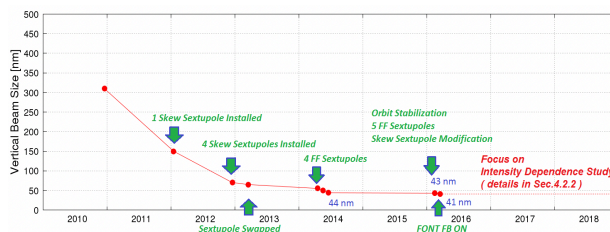


Figure 5: History of the smallest beam size achieved at the ATF2 focal point.

しかしながら、この 100 nm 以下の結果は、ATF2 の設計ビーム強度に対して約 $1/10$ となる 1×10^9 electrons/bunch で得られたものである。光学設計の観点からは、目標の 37 nm に近い値が得られていることから、Local Chromaticity Correction 方式の最終収束技術の検証は、ほぼ達成されたと判断できる。

極小ビームの調整が低いビーム強度で進められている背景は、ATF2 のビーム収束点で測定されるビームサイズがバンチ強度の増加と共に大きくなるビーム強度依存性があるためである。この主たる原因はビームラインの Wakefield であると考えられる。Wakefield はビームが通過する空間の内断面変化により生じるため、いわばビームラインの真空チャンバー構成によって異なる。最終収束システムの“光学試験”と Wakefield による影響は分けて評価するのが妥当である。

ATF はエネルギーが 1.3 GeV と低く、またビームパイプの径も約 2 cm と小さく Wakefield の影響が強くなる。また、ATF2 ビームラインには数十 nm のビーム位置分解能を有する空洞型 BPM が多数設置されており、ナノメートル極小ビームを測定する IPBSM もある。様々な試験装置の導入も可能であり、ATF2 は Wakefield の影響を定量的に研究する最適の場といえる。

一方、ILC の場合では、ATF2 と比べてエネルギーが二桁大きく、Wakefield の影響は相対的に小さくなる。様々な条件を踏まえた評価によると、ATF2 で 41 nm を達成した 1×10^9 electrons/bunch の状態は、ILC では設計ビーム強度 2×10^{10} 程度に相当すると見

積もられている。つまり、ILC における 7 nm 極小ビームの実現のためには ATF2 で確認されている Wakefield の影響は大きな問題とはならないと評価される。しかしながら、ATF2 において Wakefield の影響を深く調査し理解することは、ILC に対する影響評価の妥当性を高め、更なる高度化への知見を得るためにも重要である。

Wakefield が引き起こすビーム強度依存性には、静的と動的の二種類のビーム強度依存性が考えられる。静的なビーム強度依存性は、Wakefield 源の設置位置誤差により引き起こされるもので、ビーム軌道を Wakefield 源の中心に近づけることで減少させることができる。動的なビーム強度依存性は、ビームジッターにより Wakefield 源でのビーム位置が変わり、ビームキック量が変わることで引き起こされるものであり、ビームジッターを低減させない限り減少させることはできない。

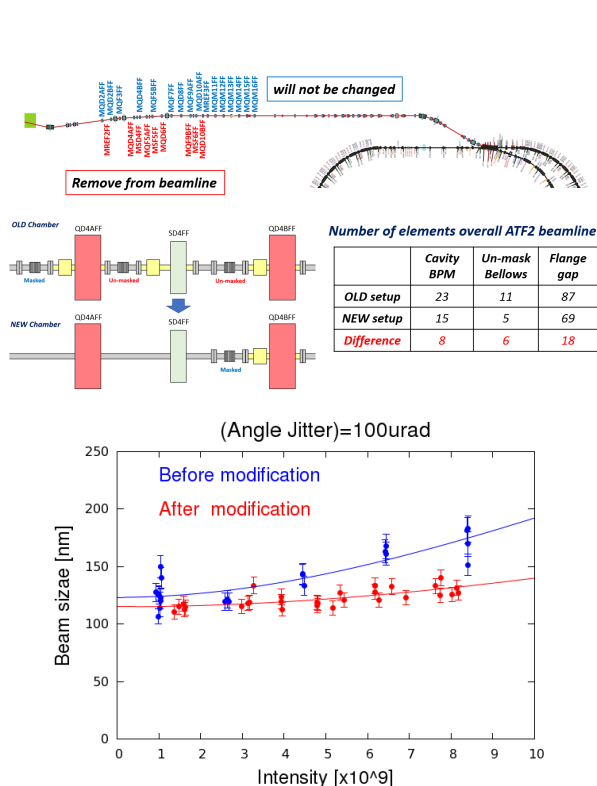


Figure 6: Beam size measured at the focal point of ATF2, before and after the reduction of wakefield sources.

Wakefield の影響を評価するため、2016 年にビームラインの機器構成を大幅に変えて比較試験を実施した。ここでは、ATF2 ビームライン全体の 1/3 にもおよぶ台数の空洞型 BPM、省略可能なフランジやベローズ、さらには普段使用しないビームモニターなどを取り外して長いストレートパイプにしたり、ベローズに RF shield contact を取り付けるなど、ビーム路の段差を軽減する対策を施した。改造前後でのビームサイズのビーム強度依存性を Fig. 6 に示す。

高いビーム強度ではビームサイズが 100 nm を越えてしまうため、IPBSM の測定モードは 30°、ビームサイズ 100~300 nm の範囲で実施された。改造後はバンチ強度の増加に対してビームサイズの悪化が大幅に改善されている。

ATF2 での Wakefield 評価試験では、新たに Wakefield 源となる構造体をビームラインに取り付け、既存の Wakefield の影響に対する変化を調べる手法が導入された。XY 可動ステージの上に Wakefield 源となる空洞を載せ、位置を変えながら影響を調査して収束点における極小ビームサイズのビーム強度依存性を調査した (Fig. 7)。これは追加した Wakefield で、既存の Wakefield を打ち消すように、ビームライン全体の Wakefield の影響を低減させる手法である。ILC にも利用できる技術である。

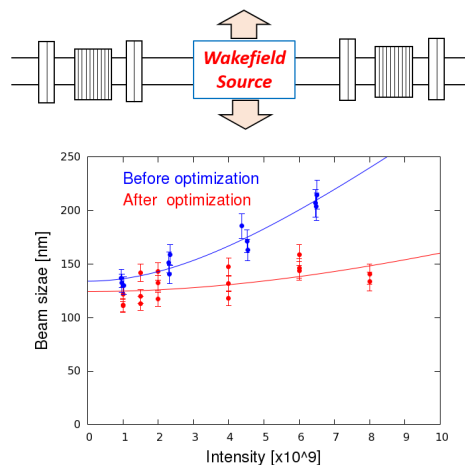


Figure 7: Reduction of the wakefield effect on a small beam at ATF2, by optimizing the position of an additional wakefield source.

2.2 ビーム位置高速制御技術開発

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。ここで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衝突点での位置をビームサイズの 1/3 程度、2 nm 程度に安定化させることが重要である。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 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位置を乱す要因となる周期はこれに比べて遅く、結果として 1 ms のバンチ列はコヒーレントに振動の影響を受ける。そこで先頭のバンチから位置ズレの情報を引き出し、後続のバンチ群の位置ズレを補正する Intra-train feedback (FONT) が提案され、Oxford 大学を中心に開発が進められてきた[9]。

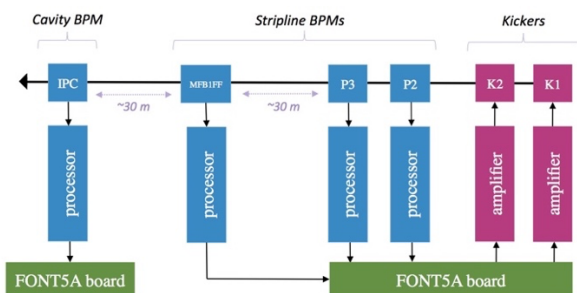


Figure 8: Setup of the EXT-FONT feedback.

ATF のダンピングリングでは、リニアックからの単バンチを 2 回または 3 回入射し蓄積することで、ILC のバンチ間隔に近い状態を作ることができる。これを flat-top 300 ns のパルスキッカーを用いて一括して取り出し ATF2 ラインに送る。

FONT の装置は ATF の取り出しビームライン（便宜上、EXT-FONT とする）と ATF2-IP 部（IP-FONT とする）の 2 カ所で進められている。

EXT-FONT は、ILC と同じ Stripline BPM と Stripline Kicker の組みからなる構成である。位置と軌道角度の補正を狙い 2 組用意され、さらに独立にビーム位置を測定するための BPM を用いて、基本技術の開発と実証試験を行ってきた (Fig. 8)。Feedback に使用される BPM のビーム位置分解能は $0.2 \mu\text{m}$ である。Feedback の演算処理には高速の FPGA が用いられている、最初のバンチ信号を得てから次のバンチに Feedback が与えられるまでの時間は 133 ns が達成されている。これは ILC で想定するバンチ間隔 336 ns の半分以下であり、まだ追加の演算処理を行う時間的余裕がある。更なるシステムの高度化が期待される。EXT-FONT のビーム安定化の例を Fig. 9 に示す。ここで大事なのはジッターが低減された状態での IP

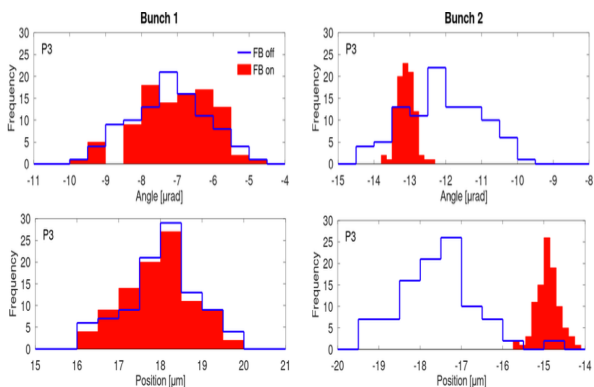


Figure 9: Intra-train feedback at ATF2. Bunch 1 shows the input of feedback and bunch 2 shows the result. Upper plots are for angle of bunch trajectory and lower plots are for bunch position.

で想定されるビーム位置ジッターであり、試験結果からは約 1 nm 程度と評価されており目標を十分に達成している。

もう一つの FONT システム、ATF2 IP 部に構築された IP-FONT については多少事情が異なる。そもそも ILC では、衝突点は Vertex 検出器などに取り囲まれており、Intra-train feedback の機器は、衝突点から 2 m 程度離れたビームライン上に置かれる。そこでのビームサイズは大きく、Stripline BPM で十分に feedback を構築できる。つまり EXT-FONT である。ATF2 での IP-FONT の試みは、ATF2 取束点は空間があり BPM を置けること、そのため ILC では不可能な IP でのビーム安定度を直接測定できることに基づいている。そのためにはナノメートルレベルの分解能を有する空洞型 BPM の実現が鍵となる。さらにこの BPM は後続バンチ (150 ns 後) との信号分離が必要であり、それを可能とする Q 値の低い空洞型 BPM でなければならない [10]。これらの要求は技術的に容易ではない。しかしながら、ナノメートルでの位置安定化を直接確認できるのは ATF2 だけであることから、可能な限り分解能を追求して安定化を直接評価することを目指している。

IP での空洞型 BPM を用いた FONT feedback 試験の結果を Fig. 10 に示す。現在の BPM 位置分解能は 20 nm であり、これにより feedback が頭打ちとなり得られた位置ジッターは 41 nm に留まっている。

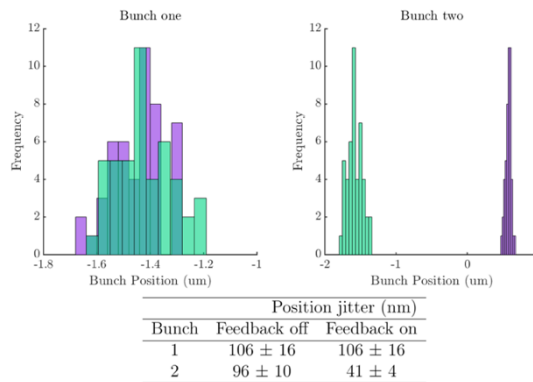


Figure 10: Beam position at IP BPM w/o FONT.

Intra-train feedback によるビームの安定化で確認された重要な結果がある。それは EXT-FONT を用いて実施された極小ビームサイズに対する動的ビーム強度依存性の低減の確認である。結果を Fig. 11 に示す。角度ジッターが大きく改善されており、ビームサイズにおいてもビーム強度依存性が改善されている [11]。

3. その他の技術開発

CERN は LHC 後 (2035 年以降) の将来計画として FCC-ee と CLIC、二つの計画案を検討している。CLIC は ILC より高いエネルギーである 3 TeV を見込んだリニアコライダー計画であり、さらに高度な

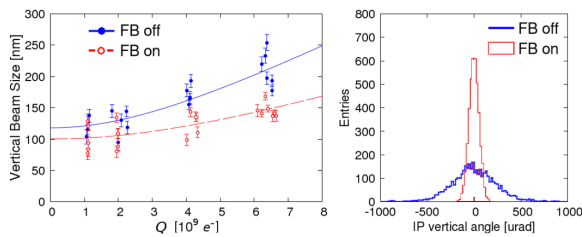


Figure 11: Improvement of beam intensity dependence by EXT-FONT feedback.

ビーム技術が要求されており、その技術開発を進める上で ATF2 での共同研究が重要となる。ILC の高度化にとっても CLIC の技術開発で得られる知見は有用であり、高い相乗効果が期待される。CLIC の最終収束ビームでは、ILC の 5 倍も大きい Chromaticity の補正技術が必要であり、それは ATF2 において 20 nm のビームサイズを実現することを意味する。この究極の極小ビーム技術開発のために CERN から Octupole magnet を持ち込み、ATF2 ビームラインでのビーム調整試験が進められている [12]。また、新しい非破壊型ビームサイズモニターとして Coherent Cherenkov Diffraction Radiation を利用するモニター開発 [13] も進行している。

4. 今後の研究開発に向けて

昨年夏に、これまでの ATF/ATF2 におけるナノビーム技術開発の成果と今後の ILC 準備期間 (4 年間を想定) に予定する技術開発計画、さらには ILC 以外の研究開発として ATF のビームを利用する様々な提案を取りこみ、包括的な内容の報告書をまとめた [14]。これを元に、今後の ATF 研究活動についての審議が、KEK 機構長により選出された国内外の加速器研究者で構成される ATF 国際評価委員会において行われ、評価が取りまとめられた [15]。成果については高い評価が得られたが、今後の技術開発を進める上で、老朽化対策や運転を継続するための予算・人員等のリソース確保については懸念が示された。これに対し、例えば ATF2 ビームラインの高度化改造計画 (ATF3) などでは、ATF 国際コラボレーション参加機関で分担し対応することが協議されている。

5. まとめ

先端加速器試験施設(ATF)では、国際リニアコライダー(ILC)で必要とされるナノメートル極小ビームの技術開発を進めている。ビーム最終収束試験ビームライン ATF2 では、41 nm のビームサイズを実現し、ILC で採用するビーム最終収束方式の妥当性をほぼ検証している。衝突点でのナノメートル位置制御技術開発では、許容されるレベルにビーム位置ジッターを抑えるための成果が得られている。その他、CLIC との技術開発も進められており、ILC 技術の更なる高度化を狙った総合的なナノメートルビ

ーム技術開発が進行している。

ILC に関わる世界の情勢は大きく動いている。2020 年 6 月には欧州素粒子物理戦略が発表され、ILC がタイムリーに実現する場合には協働して取り組みたいという欧州コミュニティの意向が示された。また、8 月には国際将来加速器委員会 ICFA により ILC の国際推進チーム (International Development Team) が発足、ILC Pre-Lab を想定した準備体制と進めるべき技術開発が取りまとめられ、2021 年 6 月に文科省に提出されている。このように ILC の実現に向けた活動がますます本格化している。今後とも ATF が担うナノメートル極小ビームの技術開発、高度化に邁進していきたい。

参考文献

- [1] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1711/1711.00568.pdf>
- [2] "ATF2 Proposal", KEK Report 2005-2 (2005).
- [3] P. Bambade *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 13, 042801 (2010).
- [4] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [5] T. Shintake, NIM A 311, 455 (1992).
- [6] T. Suehara *et al.*, NIM A 616, 1 (2010).
- [7] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 023501 (2014).
- [8] G. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- [9] P. Burrows *et al.*, Proceedings of IPAC2014, TUPME009 (2014).
- [10] S. W. Jang *et al.*, IEEE TRANS. ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 64, NO. 8, 2353-2360 (2017).
- [11] T. Okugi *et al.*, 第 16 回日本加速器学会, RPI023, Kyoto (2019).
- [12] R. Yang *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 23, 071003 (2020).
- [13] R. Kieffer *et al.*, Phys. Rev. Lett. 121, 054802 (2018).
- [14] The ATF collaboration, "ATF Report 2020"; https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf
- [15] ATF Review; <https://agenda.linearcollider.org/event/8626/>