

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)},
クルーチニン コンスタンティン^{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)}, Kruchinin Konstantin^{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

Development of the nanometer level small beam have been conducted at the Accelerator Technology Facility (ATF) of KEK. We call this small beam “nanobeam” and this development is targeting a colliding beam of the International Linear Collider (ILC). A small beam at ATF is realized with a low emittance beam generated by using the damping ring and passes it through the Final Focus System Test Beamline (ATF2). We have two major development goals. One is the realization of an ultra-small vertical beam size of 37 nm, which corresponds to the colliding beam size of 8 nm at the ILC. The another is a stabilization of beam position in nanometer level, which is expected to realize a stable beam collision of the ILC. 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 at the beam focal point of ATF2. With the progress of the small beam studies, the effect of wakefield on a nanobeam below 100 nm is recognized as the important study target at ATF2. The ATF2 (1.3 GeV) is a suitable facility for this research because it has a laser interference fringe type beam size monitor to enable the measurement of nanobeam below 100 nm. The wakefield effect on ILC (125 GeV beam) is evaluated with the results of ATF2 and expected to be small. Further study of wakefield at ATF2 will push forward the nanobeam technology and contribute to make better the beam of ILC. An upgrade plan of the ATF2 final focus beamline (ATF3 project) is proposed by the international collaboration to push forward these R&Ds.

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。最近の技術開発は ATF2 で行うものが主体であり、単バンチ、

繰り返し 3.125 Hz、バンチあたりの電子数 $\sim 1 \times 10^{10}$ 個のビームを利用している。電子源としては、バンチ間隔 5.6 ns、パルスあたり 1~10 バンチの多バンチ運転が可能である。生成された電子ビームは 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。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。ダンピングリングには 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。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、例えばリングに 150 ns 間隔で 3 バンチ分蓄積して一度に取り出すことで、ILC を模した 150 ns の連続バンチを ATF2 ビームラインに送ることができる。

ATF 技術開発の最大の特徴は、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利用できることである。定常的に垂直方向 10 pm 程度のビームを実現し利用している。

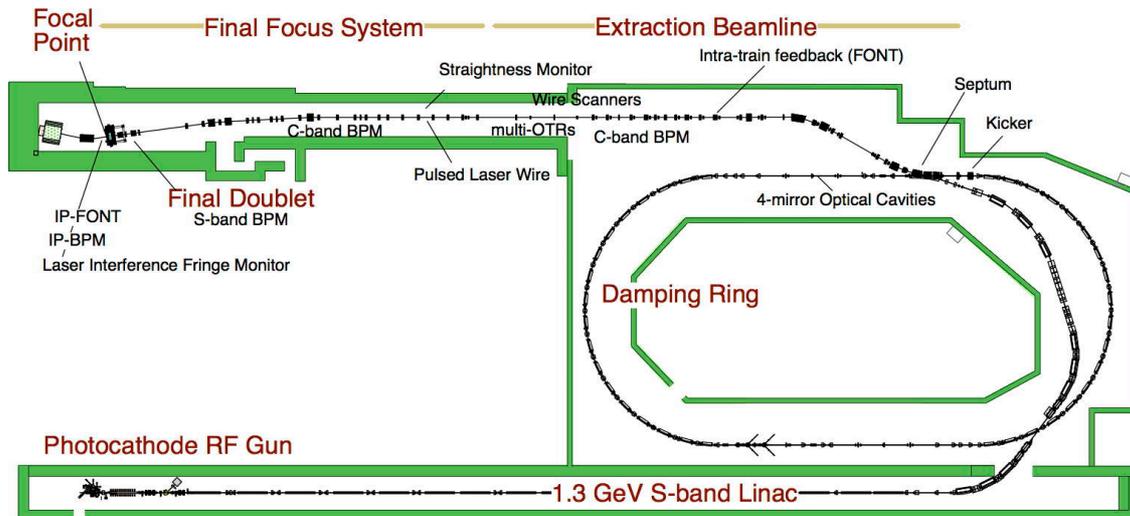


Figure 1: Layout of the ATF. 100m x 50m.

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の設計建設のために、2005年に協定書に基づく国際コラボレーションが立ち上げられている[2]。ATFのPhase-2として位置づけられ、ATF2と呼ばれている。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として貢献している。ATF2の運用は2009年に始まっている[3]。



Figure 2: ATF2 beamline (Final Focus System).

2. ナノメートルビーム技術開発

ILCで想定するルミノシティー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方式と比べて最終収束システムの長さを約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)。

2.1 ビーム最終収束技術開発

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。

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8 nm)に対応する。この極小ビームをATF2で実現することで、ILC最終収束技術を実証すること、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 (ルミノシティー最適化)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。それを可能とするのは前述したSLAC-FFTB実験でも利用されたレーザー干渉縞型ビームサイズモニター[5]であり、ATF2ではそれを改良したものを導入している[6]。

ATF2のレーザー干渉縞型ビームサイズモニターは、最終収束系の収束点 (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、干渉縞光子と電子ビームの逆コンプトン散乱 γ 線数の変化 (Modulation)を計測する。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、強度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ため、導き出されるビームサイズは実際のビームよりも大

きく評価されており、いわば上限値として見るべきものである。

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物理的に決定し、それに応じてビームサイズの測定範囲が定まる。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。

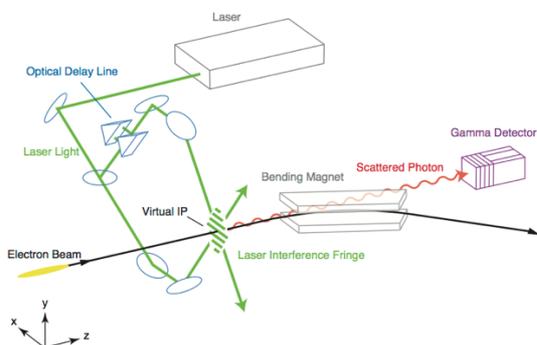


Figure 3: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor at ATF2.

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ク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。このようにして 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。目標の 37 nm と遜色ない値を実現しており、ILC で採用する Local Chromaticity Correction 方式の最終ビーム収束が十分に機能することを実証したものと判断している。

2.2 ビーム位置高速制御技術開発

ILC の電子・陽電子ビームは、それぞれ衝突点で垂直方向 8 nm 程度に絞られて衝突する。その相対的位置の安定性は重要であり、衝突点において 2 nm 程度に安定化することが求められている。ビームは中央エリアに配置されるダンピングリングから、それぞれの約 10 km の主線型加速器トンネルを通して ILC の端まで送られる。そこから向きを変えて直線トンネルに戻る際に主線型加速器で加速、最終収束システムで衝突ビームに調整される。この間、地盤振動や加速器機器の変動を受け、衝突点での位置ズレが生じる。このズレを補正する高速フィードバックが必要である。

ILC のビームは繰り返し 5 Hz の多バンチ列であり、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 間隔で作られ、バンチ全体の時間幅は約 1 ms となる。地盤振動などビーム位置を乱す要因となる周期（応答時間）はこれに比べて十分長く、結果として 1 ms の多バンチ列はコヒーレントに振動の影響を受けることになる。そこで先頭バンチの位置を検出し、後続のバンチ群の位置を補正する Intra-

train feedback が提案され、開発が進められてきた[9]。

ILC での Intra-train feedback 装置は衝突点から 2 m 離れた所に置かれる。ここでは衝突後のビーム軌道と衝突に向かうビーム軌道が極めて接近しており、衝突で蹴られたバンチの位置から相手側の衝突に向かうビーム位置の調整を行うのが効果的である。必要な位置分解能は Stripline BPM で十分とされている。一方、電子ビームのみの ATF では、連続したバンチ列自身を用いることになる。ここではダンピングリングに 150 ns 間隔で 3 バンチ蓄積し、それを一括して取り出すことで ILC を模したバンチ列を作り出している。

ATF の Intra-train feedback の技術開発は、主に ATF2 ビームライン上流部で進められた。装置は Stripline BPM、高速演算回路、Stripline Kicker からなり、ILC と同じ構成である。これを 2 組用いることで位置と軌道角度を補正する技術開発と実証試験を行ってきた (Fig. 4)。開発された装置の Feedback 応答時間は、先頭バンチの位置検出から次のバンチを補正するまでとして 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、追加の演算処理を行う時間的余裕があることから更なる高性能化が見込まれる。ビーム安定化の例

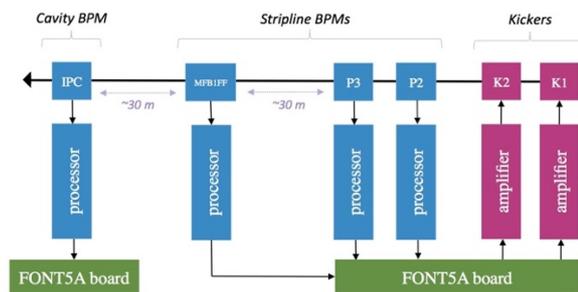


Figure 4: Setup of the EXT-FONT feedback.

を Fig. 5 に示す。ここで大事なことはジッターが低減された状態での IP で想定されるビーム位置ジッターであり、試験結果から約 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 1 箇所、ATF2 収束点でも Intra-train feedback の試験が試みられている。ILC とは異なり、ATF2 では収束点に BPM を置くことができるため、直接ナノメートル極小ビームでの Intra-train feedback を試みることができる。ただしこのためには数 nm の位置分解能を有する BPM 開発が必要となる。元々 ATF2 では、収束点に特殊な空洞型 BPM を置いてナノメートルのビーム安定度を直接確認することを目指していた[10]。この BPM 開発自体が挑戦的な技術開発であるが、それを利用して Intra-train feedback を試みるというものである。現在までにこの BPM 開発は分解能 20 nm まで進められ、それに応じた feedback 性能が得られることを確認している。更に BPM の分解能を追求したいところだが、実際のところ ILC では使わない BPM 開発であり、且つ多大な労力が必要なことから、これ以上の追求は進められていない。

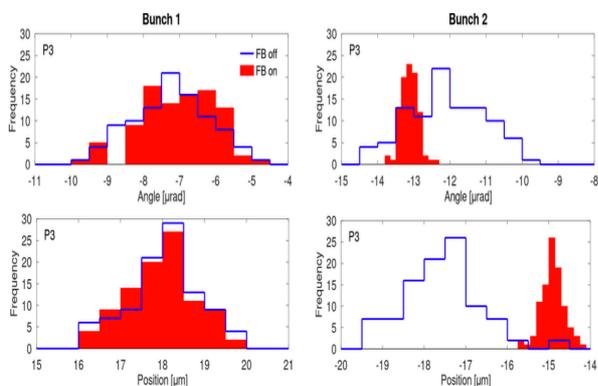


Figure 5: Intra-train feedback at ATF2. Bunch 1 shows the input of feedback and bunch 2 shows the result. Upper plots are for angle of bunch trajectory and lower plots are for bunch position.

ATF2 上流部の Intra-train feedback 試験の結果も合わせて、基本的にこの feedback 技術は実証されていると判断している。

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。それは極小ビームサイズに対するビーム強度依存性の低減の確認である。結果を Fig. 6 に示す。角度ジッターの改善により、ビーム強度依存性が緩和されることを確認した[11]。

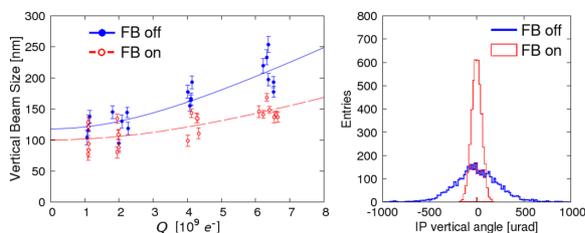


Figure 6: Improvement of beam intensity dependence by the Intra-train feedback.

2.3 ナノメートルビームにおける Wakefield の影響

ATF2 での最終収束技術開発の初期段階において、測定される極小ビームのビームサイズがバンチあたりの電流(粒子数)の増加と共に大きくなることが見いだされた。これは主に wakefield によるものと推測され、以後、その影響の評価研究が進められている。

前述の最終収束技術開発は wakefield の影響を抑える条件で進められている。wakefield はビームが通過する空間の内断面変化により生じ、いわばビームラインの真空チェンバー構成によって変わる。最終収束システムの“光学設計の検証”と wakefield による影響は分けて評価するのが適切である。

ATF はエネルギーが 1.3 GeV と低く、またビームパイプは直径で 24 mm と小さい。そのため wakefield の影響が強くなるが、それでもその影響が問題になってくるのは、極小ビームサイズがおよそ 300 nm を下回るまで絞られてきた場合である。ATF2 にはナノメートル極小ビーム測定を可能とするレーザー

干渉縞型ビームサイズモニターがある。また、この試験ビームラインには、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な場となっている。

極小ビームへの wakefield の影響については、wakefield 源とビームとの関わり方の視点から、静的な要因と動的な要因に分けて評価を進めている。静的な要因はビーム軌道に対する wakefield 源の設置ズレにより引き起こされるものを示し、再アライメントなどでビーム軌道と wakefield 源の中心を近づけることにより緩和が可能なものである。動的な要因はビームジッターなどビームの動的な変化によって生じるものを想定した。これは wakefield 源におけるビーム位置が変わることによって wakefield によるキック量が変わるために生じる影響であり、ビームジッターを低減するなどして緩和できるものである。

2016 年にビームラインの機器構成を大幅に変えて wakefield の影響比較試験を実施している。ATF2 ビームライン全体の 1/3 に相当する数の空洞型 BPM、省略可能なフランジやベローズを取り去り、その単純なパイプを延長、さらには普段使用しないビームモニターの取り外し、ベローズなどの段差やギャップを軽減する RF shield contact を取り付けるなどの対策を施した。その結果、極小ビームサイズのバンチ強度依存性が大幅に改善された (Fig. 7)。残されている wakefield 源による影響を可能な限り緩和するための取り組みも進められている。ビームラインの β 関数の大きな場所に新たな wakefield 源となる構造体を取り付け、既存の wakefield の影響に対する変化を調べる手法を導入した。XY 可動ステージの上に wakefield 源を載せ、位置を変えながら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

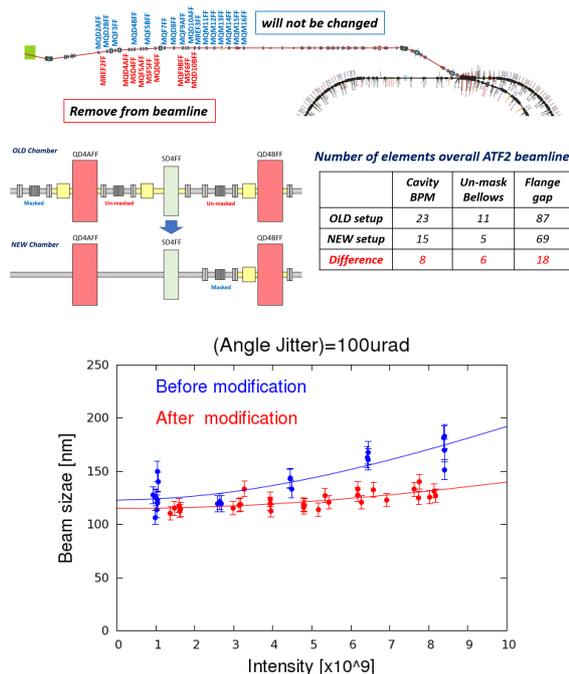


Figure 7: Beam size measured at the focal point of ATF2, before and after the reduction of wakefield sources.

した (Fig. 8)。これは既存のビームライン全体での wakefield の影響を、追加した wakefield 源を用いて打ち消すように低減させる手法であり、電流依存性の緩和を確認できた。ILC でも利用できる技術である。

ここで ILC の衝突ビームに対する wakefield の影響に触れておきたい。ILC ではビームエネルギーが ATF より二桁大きく、個々の wakefield 源の影響は相対的に小さくなる。しかし、ビームラインは数 km と長いこともあり、ATF2 での試験結果、wakefield 源の計算、シミュレーションなどから総合的に影響の評価を行った。その結果、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} electrons /bunch に相当するであろうこと、つまり、ILC における 8 nm 極小ビームは、ATF2 での実績に基づいて達成可能なものと考えられ、wakefield の影響が大きな問題とはならないと見積もられている。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ことは言うまでも無い。今後も重点課題として継続して取り組んでいくことにしている。

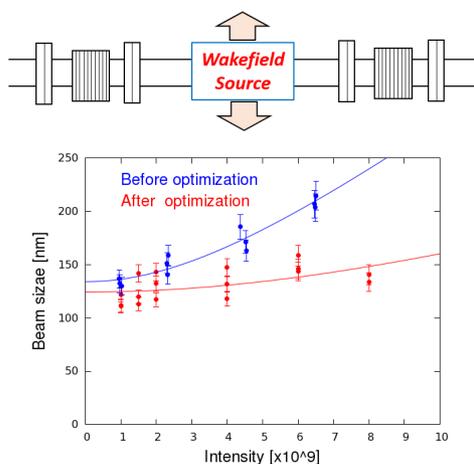


Figure 8: Reduction of the wakefield effect on a small beam at ATF2, by optimizing the position of an additional wakefield source.

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、さらに高度なビーム技術が要求されている。これらの技術開発を進める上で ATF2 での共同研究が重要とされている。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 倍大きい Chromaticity を補正する高い技術が必要であり、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

2020 年 9 月には、ATF/ATF2 におけるナノビーム技術開発の総合的な評価委員会を開催し、今後の ILC 計画の進展を想定しながらナノビーム技術開発の国際拠点としての ATF 高度化 (ATF3 計画) が議論された [14, 15]。CERN を中心とする欧州では日米との加速器技術開発を実施するための交流事業 EAJADE が採択され、2023 年 1 月から開始される。その中には ATF3 計画が主要な交流事業として計上されており、今後活発な共同研究が期待されている。

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。また、衝突点におけるナノメートル位置制御技術開発でも、許容されるレベルまでビーム位置変動を安定化させる高速フィードバック技術が実証されている。最近の主要なテーマは、これらの更なる技術の熟成・高度化に加え、ナノメートル極小ビームに対する wakefield の影響研究が挙げられる。100 nm 以下の極小ビームサイズを唯一測定できる ATF2 は貴重な研究拠点となっている。今後も国際コラボレーションを基盤とした体制の下、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を進めて行く。

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/>