

## 先端加速器施設(ATF)の現状

### STATUS REPORT OF THE ACCELERATOR TEST FACILITY

照沼信浩<sup>#, A, B)</sup>, 久保浄<sup>A, B)</sup>, 黒田茂<sup>A, B)</sup>, 奥木敏行<sup>A, B)</sup>, 内藤孝<sup>A, B)</sup>, 福田将史<sup>A, B)</sup>, 荒木栄<sup>A)</sup>,  
森川祐<sup>A)</sup>, 田内利明<sup>A)</sup>, Alexander Aryshev<sup>A, B)</sup>, 阿部勇樹<sup>B)</sup>, ATF 国際コラボレーション<sup>B)</sup>

Nobuhiro Terunuma<sup>#, A)</sup>, Kiyoshi Kubo<sup>A)</sup>, Shigeru Kuroda<sup>A)</sup>, Toshiyuki Okugi<sup>A)</sup>, Takashi Naito<sup>A)</sup>, Masafumi Fukuda<sup>A)</sup>,

Sakae Araki<sup>A)</sup>, Yu Morikawa<sup>A)</sup>, Toshiaki Tauchi<sup>A)</sup>, Alexander Aryshev<sup>A)</sup> and the ATF International Collaboration<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

<sup>C)</sup> <http://atf.kek.jp>

#### 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. The final-focus test beamline called ATF2 aims to establish techniques to realize the nanometer beam size and its position stabilization at the ILC interaction point. The goal of small beam at ATF2 is 37 nm which is corresponding to 7 nm for ILC and can be realized by using a low emittance beam from the damping ring. The nanometer level beam stabilization has been studied by the intra-train feedback system with 133 ns latency. A beam size of 41 nm at the ATF2 focal point was successfully demonstrated. At present, the most important theme is a study of the wakefield effect on the nanometer beam. It has been conducted using an additional wakefield source to reduce the effects from originals in the beamline. Recent status conducted by the ATF international collaboration is reported.

#### 1. はじめに

KEK の先端加速器試験施設(Accelerator Test Facility, ATF)では、国際リニアコライダー(ILC)[1]の衝突ビームとして必要なナノメートル極小ビームを安定に実現するための研究開発を進めている。

ATF は電子加速器システムであり、光陰極型高周波電子銃、1.3 GeV S バンドリニアック、ダンピングリング、ビーム取り出しラインおよび最終収束試験ビームライン(ATF2)で構成されている (Fig. 1)。光陰極型高周波電子銃ではバンチあたり最大 $2 \times 10^{10}$  個

の電子を生成する。高周波電子銃でビーム生成に使用するレーザーは 357 MHz と 178.5 MHz の 2 種類あり、前者の場合、リニアックで加速可能なバンチ列として、ビームパルスあたり最大 20 バンチ (2.8 ns 間隔) が生成可能である。ダンピングリングでは、線型加速器から送られてくるマルチバンチビームを最大で 3 パルス分を蓄積することができる。ダンピングリングへの入射から取り出しまでは約 300 ms である。ATF 全体としてビームの繰り返しは 3.125 Hz としている。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

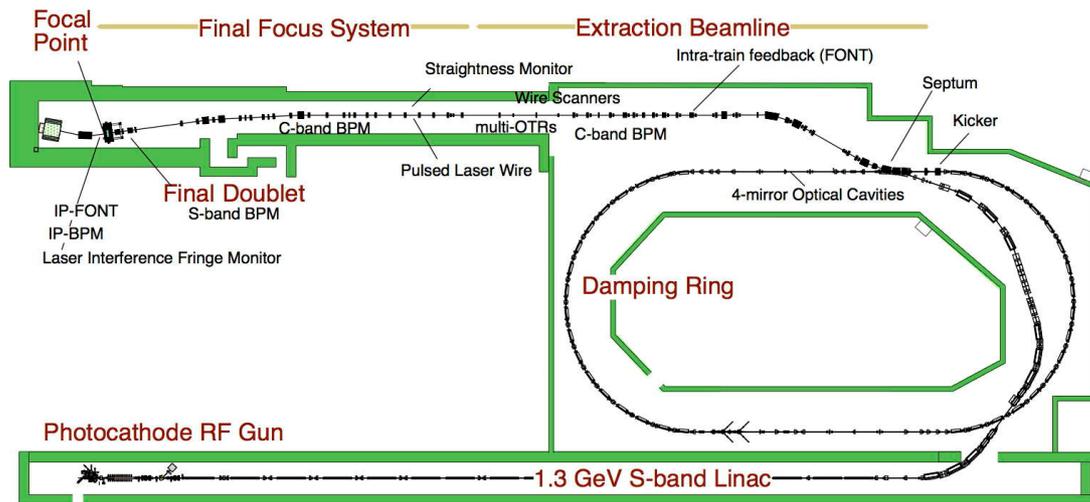


Figure 1: Layout of the ATF. 100m × 50m.

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

術開発に利用できることである。

定常的に垂直方向 10 pm 程度のビームが使われている。今までに達成した最小のエミッタンスは垂直方向 4 pm である。

最終収束試験ビームライン(ATF2; Fig. 2)では、ILC で必要なナノメートル極小ビーム技術開発を行う[2]。これは、垂直方向 10 pm の低エミッタンスビームを利用することで可能となるものであり、それを実現できる ATF は世界的にもユニークなビーム技術開発の拠点である。この魅力的な環境のもとで、リニアコライダーのビーム技術開発を国際的な協力体制で実施することを狙い、2005 年に協定書に基づく ATF 国際コラボレーションを立ち上げた。ATF2 ビームラインは、設計から建設にわたり国際的な分担で進められ、2010 年から運用が開始されている[3]。



Figure 2: ATF2 beamline (Final Focus System).

ビーム運転時間は年間 12~14 週程度である。ATF におけるナノメートル極小ビーム技術開発に対する海外の関心は高く、とりわけ CERN では CLIC にも繋がる技術開発でもあることから、KEK との間で MOU 協定を結び、若手研究者の派遣や運転経費の一部となる資金的な協力も行われた。

## 2. ナノメートルビーム技術開発

ILC の設計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。この技術開発では、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。しかしながら、ビーム調整方法はやや複雑であり、何よりも原理実証が必要であった。そこで ATF の低エミッタンスビームを利用する最終収束システムを構築し、ILC に比べて低エネルギーの ATF であっても、ナノメートル極小ビームの実証試験が可能であることが提案された。ILC と同じ Local Chromaticity Correction 方式のもと、ATF2 計画が開始されたのである。

ATF2 計画には二つの重要な技術開発項目がある。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のナノメートルレベルでの位置制御技術である。

### 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に基づいている。Energy spread は 0.1 %、natural vertical chromaticity はおよそ 10000 とされ、さらに電磁石の field error に対する許容度は ILC のものと同様かより厳しくしている。最終四極電磁石から衝突点までの距離  $L^*$  やビームエネルギーの違いなどにより、250 GeV での設計値は垂直方向ビームサイズ 7 nm となる。これは ATF2 での 37 nm に相当する。従って、ATF2 において 37 nm の極小ビームの実現を目指し、ILC 最終収束技術の実証、更なる高度化への知見を得ることを目標とする。

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。直接電子ビームの大きさを測ることが必要となるが、数十 nm のビームを測定できるのは FFTB 実験(SLAC, 1990 年代)のために開発された新竹モニター [5]のみである。ATF2 では FFTB の装置をさらに発展させたものを使用している(Fig. 3)。

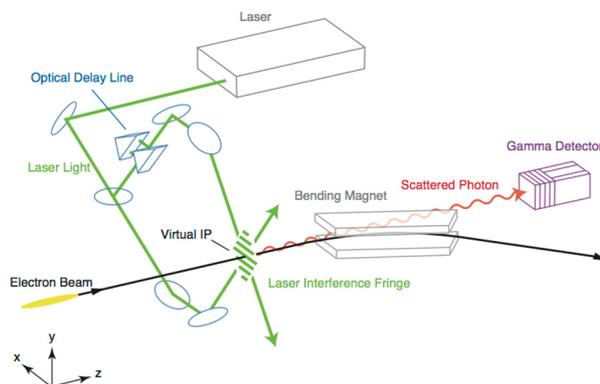


Figure 3: Schematic configuration of the nanometer beam size monitor at ATF2.

ATF2 の装置は最終収束ビームラインの 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。電子ビームに対して干渉縞を動かし、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  $\gamma$  線数の変動 (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る。得られるビームサイズは様々なふらつきの影響を含んだ結果であり、上限として解釈すべきものである。

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。ATF

では 3 段階の交差角モードが用意されており、設計上は数ミクロンから 20 nm 程度までの測定範囲をカバーしている[6]。Figure 4 は ATF2 の仮想衝突点を囲むレーザー交差システムである。

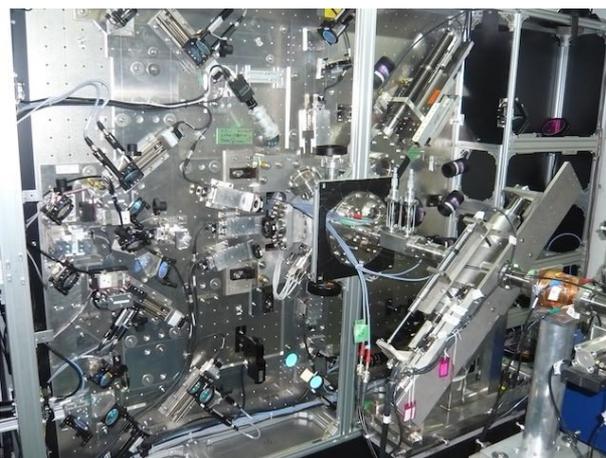


Figure 4: IPBSM laser crossing system at ATF2 IP.

極小ビームへの絞り込み調整は以下の手順を踏む。

- (1) 最初にビームラインを立ち上げる場合などでは、通常、ビームサイズは数  $\mu\text{m}$  を越えており、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  $300\ \text{nm}$  程度まで追い込む。
- (3) 次に第二の交差角  $30^\circ$  モードに移り、さらに  $100\ \text{nm}$  程度までビーム調整を進める。
- (4) 最後に交差角  $174^\circ$  モードに切り替え、目標である  $37\ \text{nm}$  を目指したビームサイズ調整を行う。

ここでは必要に応じて交差角を戻し、再調整を繰り返しながらビームサイズを追求することになる。ビームサイズが小さくなればなるほど、コンプトン散乱の安定な実現とその測定が必須となってくる。上流で生じたバックグラウンド線の低減、ビーム位置の安定化、レーザーの安定化など、全体的な高度化が必須となってくる。

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 極電磁石を使って技術開発が進められてきた[7,8]。2012 年に初めて  $100\ \text{nm}$  の壁を越え、2014 年には FFTB 実験の  $70\ \text{nm}$  をさらに下回るビームサイズ  $44\ \text{nm}$  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、世界最小を更新する  $41\ \text{nm}$  を確認するに至った。

しかしながら、この  $100\ \text{nm}$  以下の結果は、設計ビーム強度の約  $1/10$  となる  $1 \times 10^9$  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  $37\ \text{nm}$  に近い値が得られていることから、Local Chromaticity Correction 方式の技術検証は満足のいくレベルにあると判断できる。

一方で、ビーム電流の増加と共にビームサイズが増大しており、この原因がビームラインの Wakefield であることが明らかになった。ATF2 のナノメートルビーム測定だからこそ見えてきた現象である。言い方を変えれば、このような Wakefield の影響を定量的に研究するために ATF2 は最適と言える。

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  $41\ \text{nm}$  を達成した  $1 \times 10^9$  electrons/bunch の状態は、ILC では設計ビーム強度  $2 \times 10^{10}$  程度以上に相当すると見積もられている。つまり、ILC における  $7\ \text{nm}$  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ている。とはいうものの、ATF2 で Wakefield の影響を深く調査し理解することは、ILC における検討の妥当性を高めるためにも重要である。

Wakefield の影響を評価するために、ビームラインの機器構成を変えた比較実験を進めている。ATF2 ビームライン全体の  $1/3$  にも及ぶ空洞型 BPM を取り外したり、ビームパイプ段差を軽減するなどして、wakefield の影響を低減させる改造を実施している。

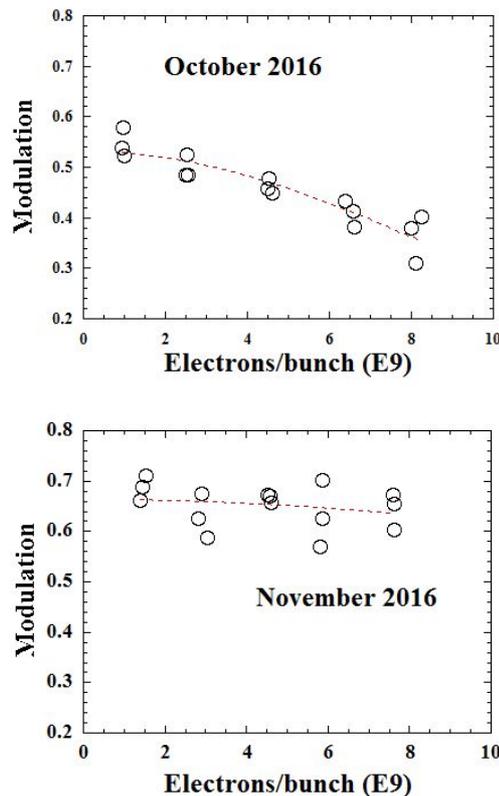


Figure 5: Beam intensity dependence of the beam size signals (modulation): measured in October (before reduction of wakefield sources) and in November (after reduction), 2016.

Fig.5 は改造前後でのビームサイズの電流依存性を示したものである。高いビーム電流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 の範囲での実験である。縦軸は IPBSM のコンプトン信号強度変化 (Modulation) であり、数値が高いほど小さなビームサイズを意味する。改造後はバンチあたりの電子数が増えても Modulation の低下が大幅に改善されており、また絶対値も上がっている。現在は、積極的に Wakefield の影響を見るために、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べている。この方法を応用して、ビームラインで生じる Wakefield の影響を打ち消し低減させることなども検討されている。

## 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、つまり 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いる [9]。

FONT の技術開発は ATF の取り出しビームラインと ATF2 の仮想衝突点の 2 カ所で進められている。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ラインに送る。取り出しラインには、2 台の Stripline kicker と 3 台の Stripline BPM からなる FONT システムが構築されており、基本技術の開発と実証試験が精力的に進められてきた (Fig. 6)。このシステムのビーム位置分解能は、バンチ電荷に依存して改善するが、0.5~0.2 μm である。最初のバンチ信号を得てから次のバンチに Feedback を与えるまでの時間は 133 ns と実測されている。これは ILC で想定するバンチ間隔の半分以下であり、更なる演算処理によるシステムの高度化が期待されている。昨年はこの FONT feedback の心臓である FPGA ボードの firmware 最適化により、取り出しラインの場所で、1.78 μm のビーム位置ジッターを 0.17 μm まで低減することに成功している (Fig. 7)。ジッターの低減率は ILC での要求を満たすレベルにある。

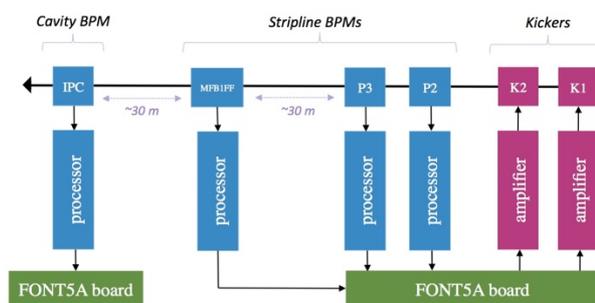


Figure 6: Setup of the upstream FONT feedback.

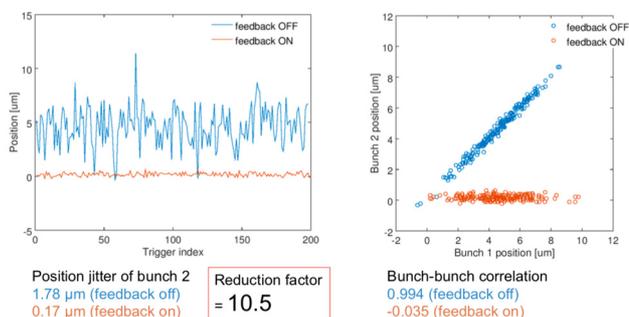


Figure 7: Setup of the upstream FONT feedback.

ILC の衝突点は Vertex 検出器で取り囲まれており、ナノメートルのビーム位置ジッターを測定する BPM を設置することはできない。一方、ATF2 の仮想衝突点ではナノメートルレベルの分解能を有する空洞型 BPM を置くことで、ビーム位置の安定化を直接確認できると期待されている。ここでは 2 nm 程度の分解能を持ち 150 ns 後の後続バンチとの信号分離を可能とする Q 値の低い空洞型 BPM が必要となる [10]。ATF2 では、ビームサイズを測定する IPBSM レーザーを通す必要があるため、仮想衝突点 (IP) を挟んで、上流に一体化された BPM2 台、下流に独立な 1 台を、同じ真空チェンバー内に設置している (Fig. 8)。各々の BPM ブロックには相対位置調整や感度較正を行うためにピエゾムーバーが取り付けられており、

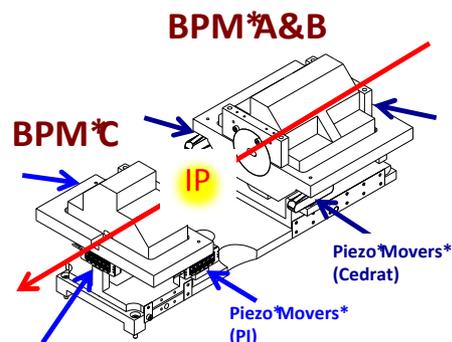


Figure 8: Cavity BPM on piezo mover for ATF2.

上下左右に 150  $\mu\text{m}$  動かすことができる。

ここで Feedback の限界を決定するのは BPM の位置分解能である。見極めたいビーム位置の安定度は 2 nm であるが、この分解能を実現する BPM は技術的に容易ではない。実際のところ、ILC では FONT-BPM が設置できるのは衝突点から 2mほど離れた位置であり、ビームサイズは  $\mu\text{m}$  に近く、2 nm の分解能は必要とされていない。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 以外には存在しないことから、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. 9 に示す。以前得られていた Feedback の結果は、200 nm 台のビーム位置ジッターを 80 nm 台に低減するもの[11]であったが、現在はほぼ 40 nm 程度まで低減することができている。これは BPM 読み出し位置分解能の改善によるものである。現在の分解能は 40 nm であり、これにより feedback 性能が制限されている。BPM 読み出し系の試験では、単バンチで電荷を上げたビームに対して 20 nm の分解能が確認されている。今後、マルチバンチでの feedback 試験においてビーム強度を上げていき、更なる安定化、技術の確認を進めていきたい。

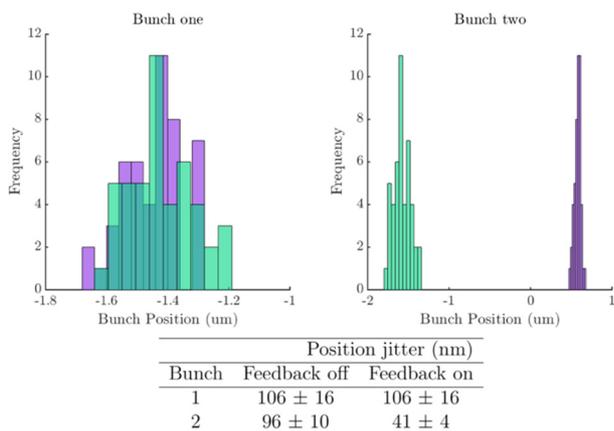


Figure 9: Beam position at IP BPM w/wo FONT.

### 3. その他の技術開発

近年、ATF の研究開発において、CERN との共同開発の比重が大きくなってきている。これは ILC のみならず CERN が検討を進めている CLIC にも共通となるナノメートルビーム技術開発があること、更には ILC 以上に先端的な技術開発が必要であり、ATF2 でのビーム試験が効果的なためである。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[12]。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。

ILC や CLIC に使用する collimator の開発[13,14]、非破壊型ビームサイズモニターとしての Optical Diffraction Radiation (ODR) monitor の開発[15]など、CERN と共同で進めている。

CLIC では、床振動によるビーム位置のズレを高速で補正するために、ビームが来る前に、あらかじめ床振動を測定して対応する補正キックを生成する feedforward 技術が検討されており、この技術開発も ATF2 を利用して進められている。CERN から高感度振動計 14 個が持ち込まれ、FONT フィードバックと連動させるなどの試験が進められている[16]。

### 4. 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はじめ、各種の先端的ビーム診断装置やビーム制御装置など、多くの加速器でも展開が期待される技術開発を進めている。国際コラボレーション体制のもとで国内外から多くの研究者が参加しており、特に大学院生の教育の場として重要な役割を担っている。

ナノメートルビーム技術開発を行う ATF2 では 40 nm 台のビームサイズを実現すると共に Wakefield の影響評価試験を進めている。衝突点でのナノメートル位置制御技術開発では、ビーム位置ジッターを 1/10 以下に低減するなどの成果を得ている。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。

### 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report (2013); <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [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. Bromwich *et al.*, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, TUPIK112 (2017).
- [12] M. Patecki *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 101001 (2016).
- [13] R. Yang *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 051001 (2018).
- [14] N. Fuster-Martinez *et al.*, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, TUPIK075 (2017).
- [15] R. Kieffer *et al.*, NIM, B 402, 88-91 (2017).
- [16] D. R. Bett *et al.*, NIM, A 895 10-18 (2018).