

KEK 先端加速器施設(ATF)におけるナノビーム技術開発の現状

STATUS FOR DEVELOPMENT OF THE NANOMETER BEAM TECHNOLOGY AT THE ACCELERATOR TEST FACILITY

奥木敏行^{#, A, B)}, 阿部優樹^{A, B)}, 荒木栄^{A)}, アリセフ アレクサンダー^{A, B)}, 久保浄^{A, B)}, 倉田正和^{A, B)},
黒田茂^{A, B)}, 照沼信浩^{A, B)}, 内藤孝^{A)}, 中村英滋^{A, B)},
福田将史^{A, B)}, ポポフ コンスタンティン^{A, B)}, 森川祐^{A)}
Toshiyuki Okugi^{#, A, B)}, Yuki Abe^{A, B)}, Sakae Araki^{A)}, Alexander Aryshev^{A, B)}, Kiyoshi Kubo^{A, B)},
Masakazu Kurata^{A, B)}, Shigeru Kuroda^{A, B)}, Nobuhiro Terunuma^{A, B)}, Takashi Naito^{A)}, Eiji Nakamura^{A, B)},
Masafumi Fukuda^{A, B)}, Konstantin Popov^{A, B)}, Yu Morikawa^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

The KEK Accelerator Test Facility (ATF) is developing nano-beam technology necessary for the International Linear Collider (ILC) based on the ATF International Collaboration. The ATF has a damping ring capable of generating low-emittance beams necessary for the ILC and the ATF2 beamline capable of focusing the low-emittance beams into the nanometer size ultra-small beams. The ATF2 beamline has beam diagnostic devices for the nanometer-sized ultra-small beams, such as cavity-type BPMs with 20 nm position resolution and a beam size monitor to measure nanometer-sized ultra-small beams by utilizing laser interference fringes. This makes it a facility capable not only for ILC beam focusing technology development but also for a wide range of research related to nanometer-sized ultra-small beams. The ATF2 beamline has also carried out an important role in the ILC Technology Network (ITN) in recent years, advancing research and development with three main themes: nano-beam focusing technology, nano-beam stability, and nano-beam diagnostics technology. As part of these efforts, various devices were updated in these coupled years in association with the upgrading of the ATF2 beamline. We will report on the upgrading of the ATF2 beamline and the development research being conducted at ATF.

1. はじめに

KEK では 国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider, ILC)[1] に必要な加速器技術開発を進めるため、先端加速器試験施設 (ATF) においてナノメートル極小ビームを安定に実現する技術開発をおこなっている。ATF の加速器構成を Fig. 1 に示す。ATF では光陰極型高周波電子銃で生成された電子ビームを S-band 線型加速器で 1.3 GeV まで加速した後、ダンピングリングに送る。ATF ではパルスあたり 1~10 バンチの多バンチ運転が可能であり、バンチ間隔 5.6 ns、バンチあたり $\sim 1 \times 10^{10}$ 個の電子を 3.125 Hz の繰り返しで生成することが出来る。ダンピングリングに送られた電子ビームは、放射減衰により低エミッタンスビームに変換される。ダンピングリングでは定常的に垂直方向 10 pm 程度まで電子ビームのエミッタンスを減衰することができ、この低エミッタンスビームを常時利用できることが ATF の大きな特徴となっている。ダンピングリングの下流には ATF2 ビームラインがあり[2]、ダンピングリングによりエミッタンスビームが減衰された低エミッタンスビームを利用することで、ILC に必要なナノメートル極小ビームに対する技術開発が実施可能となる。ATF2 ビームラインは、ILC の最終収束システムと全く同じ電磁石構成のビームラインになっており、電磁石の磁場の誤差の許容値も ILC と

同程度になるように設計されている[3]。ATF2 ビームラインでは目標値の 37 nm と遜色ない世界最小値の 41 nm までビームサイズを絞ることができている[4-6]。ATF2 ビームラインにおける技術開発の結果、ILC の設計にも採用されている Local Chromaticity Correction 方式による最終収束システム[7]の有効性や、その調整方式が十分に機能することが実証され、ATF2 ビームラインで実証された最終収束ビームラインでのビーム収束手法が ILC の現設計でも採用されている。

2. 国際協働によるナノビーム開発研究

2005 年に ATF 加速器に最終収束ビームラインを設計建設のため、協定書に基づく ATF 国際コラボレーションが立ち上げられた[2]。この ATF 国際コラボレーションに基づく計画は ATF2 計画と呼ばれ、建設された最終収束ビームラインを ATF2 ビームラインと呼んでいる。ATF2 ビームラインの運用は 2009 年に始まり[8]、ATF2 計画では海外の研究機関はビームラインの設計や運転の協力だけではなく、In-kind として電磁石や空洞型ビーム位置モニターなどの機器の貢献がなされた。ATF 国際コラボレーションを通して、ATF2 では ILC に必要なナノメートル極小ビームを実現し、ILC で採用されるビームの最終収束方式の妥当性がほぼ検証された。また、収束点におけるナノメートル位置制御技術開発でも、ILC で許容されるレベルまで電子ビームの位置変動を安定できる高速フィードバック技術が実証された[9]。

[#] toshiya.okugi@kek.jp

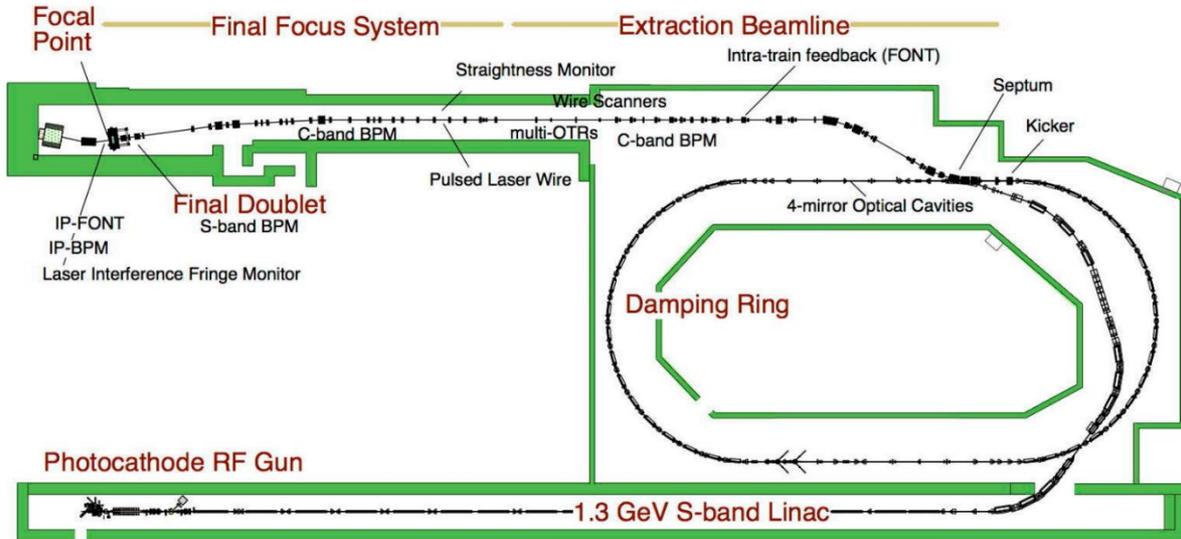


Figure 1: Schematic layout of the Accelerator Test Facility (ATF).

2020年8月には国際将来加速器委員会 ICFA が ILC 国際推進チーム(International Development Team, IDT)を立ち上げた。IDT は ILC 計画の準備段階として、日本の ILC 準備研究所(Pre-Lab)に向けた準備をおこなっている。IDT では ILC 準備研究所ができる前に始めるべき加速技術開発項目(work package, WP)をまとめ[10]、2022年3月には、これらの WP のうち、より早く開始することが望ましいとする加速技術開発項目として Time-critical WP をまとめた[11]。ATF におけるナノビーム開発は、Time-critical WP の中にも挙げられており、国際的な関心が高い開発項目となっている。その後、Time-critical WP を国際的に進めるための KEK と海外研究機関との研究の枠組みを ILC Technical Network (ITN) として構築している[12]。ATF 国際コラボレーションでは、2023年3月に ITN に沿ったナノビーム開発研究を推進するための新たな枠組みとして ATF2 計画を発展させた ATF 高度化計画(ATF3 計画) の kick-off ミーティングが開かれた[13]。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、EAJADE の中には ATF3 計画が主要な交流事業として計上されている、ITN の枠組みの中で ATF における国際協働は活発に進められており、昨年度は ATF を 20 週間運転して、Fig. 2 に示すように海外の研究機関から多くの研究者が ATF を訪れナノビームを中心とした研究をおこなった。

3. タイミングシステムの高度化

ATF は 1994 年から運転が開始され、建設時にはトリスタン加速器に使われていた機器の転用も少なくなかった。ATF では未だにそれらを多く使用している。それらの幾つかは既に代替品がないため、故障した際には単なる機器の更新では対応できなく、長期の運転休止のリスクが内在している。ITN の開始により増加した海外からの研究者への対応のためにも、ATF では故障の対応に時間を要する機器から優先的に更新を進めている。

その中で最も優先順位が高いのは、ATF ではタイミングシステムである。そこで、2021 年より SuperKEKB の協力のもと、タイミングシステムを旧来の CAMAC ベースの

2024年度 所属機関別集計 (海外)

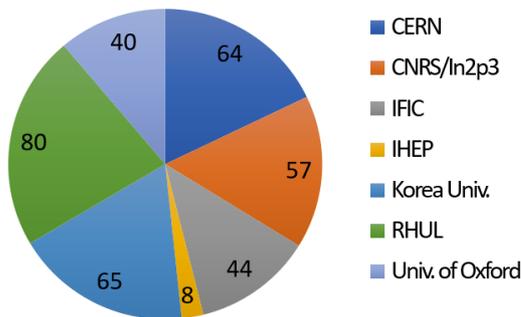


Figure 2: Statistics on the number of overseas visitors to the ATF in JFY2024. Numerical values are in person-days.

Master Oscillator (510MHz/51), Rubidium

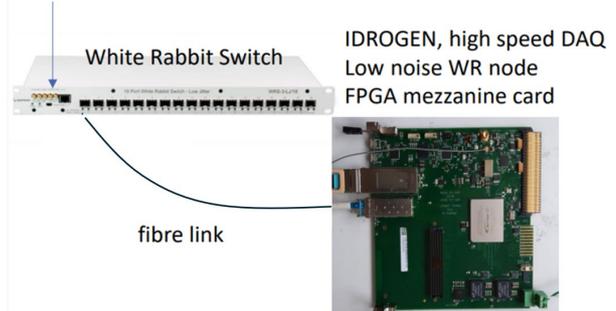


Figure 3: Timing system concept of the laser and RF synchronization test at ATF [16].

ものからイベントベースのタイミングシステムへ移行を進めている[14]。これまでに、すべての主要サブシステムと、ビーム診断装置の新しいタイミングシステムへの更新が終了している。現在は IJClab との協力の下、RF 電子銃のレーザーパルスと RF clock の同期の安定性や、それに対する電子銃直下および ATF ビーム輸送ラインでの電子ビームパラメータへの影響の調査を精力的に進めている[15,16]。

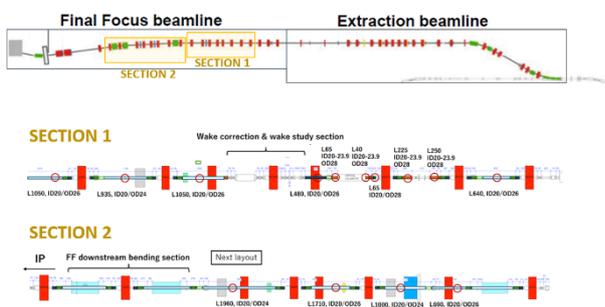
4. ITN でのナノビーム収束技術の開発

IDT がまとめた Time-critical WP では、ATF におけるナノビーム開発として、Wakefield の低減技術の高度化、多重極磁場により生み出される収差補正の高度化、および、最新の加速器技術を用いた ILC ビーム調整技術の高度化を 3 つの柱として据えている。ITN でも、これら 3 項目を開発の柱に据えている。我々は現在これらの指針に従って ATF 国際コラボレーションを主軸とした国際協働で ATF でのナノビーム技術の開発研究を続けている。

4.1 Wakefield の低減技術の高度化

ATF2 ビームラインの収束点で電子ビームはナノメートルスケールまで収束されるので、微細な Wakefield によるビームのキックの影響が収束点でのビームサイズへ大きな影響を与える。このような研究を進めることができるのは ATF2 ビームラインの大きな特徴である。

ATF2 ビームラインでは、ビームライン全体の真空チャンバーの段差を考慮した Wakefield モデルを作成して、Wakefield モデルと実測を比較することで、Wakefield のナノメートル極小ビームに与える影響の定量的な理解に努めている[17]。ATF2 ビームラインでは極小ビームを取り扱うので、ビーム輸送ラインでありながら ICF フランジのギャップのような僅かな段差でも影響が出てしまう。2023 年度の運転では ICF フランジの形状を模した多数の構造体を同時に動かすことが出来る装置を ATF2 ビームラインに入れることで、ICF フランジによる Wakefield の影響を調べ、ICF フランジがビームに影響を与えることが確認できた[18]。それを受けて、2024 年度は ATF2 ビームラインの特にビームへの影響が大きい箇所真空チャンバー内面の段差を最大限なくすように真空チャンバーの作り替えを実施した。ATF2 ビームラインにおける Wakefield 効果の低減のための真空チャンバーの更新と、真空チャンバー更新後のビームによる試験結果は[19]



使われていた磁石は、ヨーク割面にスパーサーを入れてボア径を広げたためポール形状がボア径に合っておらず12極成分が大きかったものが顕著に改善されている。このように ATF では古く問題のある電磁石を順次更新し、多重極磁場による収差補正の高度化の準備を進めている。また、ATF2 ビームラインで使用している電磁石ムーバースystemは FFTB 実験に使われていたものを使用しており、老朽化が進んでいる。特に制御回路は故障が生じた際に代替品が存在していない。2023 年度は位置制御精度が最も厳しい六極電磁石のムーバースystemを更新して、2024 年度からは位置制御精度の要求が厳しい電磁石から順次四極電磁石ムーバースystemに関しても更新を進めている。

4.3 ビーム診断装置の高度化

ビーム診断装置の高度化に関しては、昨年度は焦点ビームサイズモニターの設置位置精度の改善を進めた。ATF 焦点ではレーザー干渉計型のビームサイズモニターを使用している。そして、ビーム調整時には、ビームサイズモニターのレーザーの焦点にビーム位置を合わせている。この時、レーザーの焦点位置が正しくないと、ビームの焦点位置も理想的な位置に設定できなくなる。ATF 焦点で使用されているビームサイズモニターでは、レーザーの焦点位置は焦点ターゲットを使って調整していた。しかし、このターゲットは長いロッドを通してアクチュエーターにより焦点に挿入していたので、設置精度に難点があった。そこで、今年度は焦点ターゲットを新たに設計しなおして、焦点ターゲットの設置位置精度を改善した。更新した焦点ターゲットを Fig. 7 に示す。ターゲットは焦点を挟んだ両側で固定しているので、チェンバーに対して機械的な位置決めが容易になり、焦点ターゲットの設置位置精度が向上した。

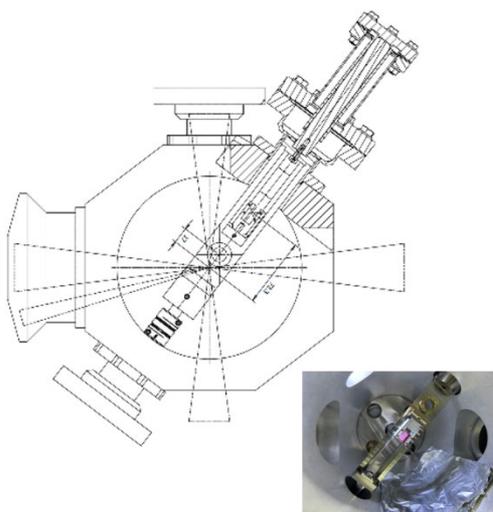


Figure 7: Schematic figure of the IP target. The target is supported at both sides of the vacuum chamber.

4.4 ビーム調整技術の高度化

ATF 加速器では機械学習を取り入れたビーム調整技術の研究も進めている。ATF では、これまでダンピングリ

ングへの電子ビームの入射効率の最大化、ATF2 収束点でのビームサイズを最小化するためのビームサイズ調整ノブの最適化、および、ダンピングリングでのエミッタンス調整をおこなってきた[22]。これらの調整で機械学習を使ったビーム調整が有用であることは分かってきたが、これまでの使われていた調整ノブの最適値を探す程度のものであった。次のステップとしては、シミュレーションによる強化学習を取り入れる必要性が高くなる。現在 ATF では、シミュレーションにより得られたビーム調整手法を実装置に効率的に転嫁できるように、CERN との国際協働で ATF 加速器のフライトシミュレーターの構築を進めている。これにより、ATF 焦点でのビームサイズ調整の新たな最適化のプロセスの構築や、最適化時間の短縮を進めていきたいと思っている。

このように ATF 加速器では随所に機械学習によるビーム調整を活用している。

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ビームの技術開発を進めている。ATF2 ビームラインでは、41 nm のビームサイズを実現し、収束点における位置制御技術開発に関しても、電子ビームの位置変動を許容されるレベルまで安定にできる高速フィードバック技術の実証が行われた。ATF2 ビームラインは 100 nm 以下のビームサイズの極小ビームを唯一生成して、それを計測できるビームラインであるため、海外の研究者の目からもナノビームに対する研究における貴重な研究拠点となっている。最近の研究動向としては、ATF 国際コラボレーションによる国際協働を軸にナノビーム開発研究の推進に大きな比重を置いて運転している。ILC Technical Network (ITN) 開始に伴って、昨年度から海外の研究者の運転への参加が増加してきた。これに対処するため、2024 年度は 20 週間運転した。また、増加したビーム運転を円滑に進めるため、機器の老朽化対策を精力的に進めている。主な老朽化対策として、2024 年度から 2025 年度にかけて、タイミングシステム、最終収束電磁石、磁石ムーバースystemの更新などをおこなった。また、ビーム焦点に置かれているビームサイズモニターのレーザー光学系を理想的なビーム軌道に合わせるために、焦点ターゲットの更新をおこなった。ATF におけるナノビーム開発は、ITN での開発の主題となる Wakefield の低減技術の高度化、多重極磁場により生み出される収差補正の高度化、および、最新の加速器技術を用いた ILC ビーム調整技術の高度化を 3 つの柱に据えて開発研究を進めている。今後も ATF 国際コラボレーションを基盤とした体制の下、ナノビーム技術の更なる高度化を狙った総合的な開発研究を進めていく。

謝辞

KEK 先端加速器施設 (ATF) は、将来加速器の性能向上に向けた研究開発の一環として、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けて研究を進められている。

参考文献

- [1] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1711/1711.00568.pdf>
- [2] "ATF2 Proposal", KEK Report 2005-2 (2005).
- [3] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 023501 (2014).
- [4] G. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- [5] T. Okugi and ATF international collaboration, Proceedings of LINAC2016, MO3A02 (2016).
- [6] The ATF collaboration, "ATF Report 2020", https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf
- [7] P. Raimondi and A. Seryi, Phys. Rev. Lett. 86, 3779 (2001).
- [8] P. Bambade *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 13, 042801 (2010).
- [9] P. Burrows *et al.*, Proceedings of IPAC2014, TUPME009 (2014).
- [10] IDT-WG2, "Technical Preparation and Work Packages during ILC Pre-Lab", https://agenda.linearcollider.org/event/9172/attachments/36570/57138/Technical_Preparation_Document_for_SRF-Part_as_final-version_01Apr2021.pdf
- [11] IDT-WG2, "Time-critical WPs for the ILC construction", https://agenda.linearcollider.org/event/9649/attachments/38003/60567/Time-Critical_WPsV8b.pdf
- [12] KEK and IDT, "Framework for the ILC Technology Network", https://www2.kek.jp/kokusai/IDT/ITN_Framework20230602.pdf
- [13] <https://indico.cern.ch/event/1259176/>
- [14] K. Popov *et al.*, "KEK 加速器試験施設タイミングシステム改良状況報告", 第 22 回日本加速器学会, WEP009, Tokyo (2025).
- [15] K. Popov *et al.*, "レーザーと RF の同期および KEK ATF における電子ビームの安定性への影響", 第 22 回日本加速器学会, FRP063, Tokyo (2025).
- [16] D. Charlet *et al.*, "Performance evaluation of a versatile and low-jitter White Rabbit board", <https://hal.science/hal-05022721v1>
- [17] Y. Abe, "Evaluation of wakefield effects to nanometer small beam", PhD thesis, Accel. Sci. Dept. SOKENDAI, 2024.
- [18] Y. Abe *et al.*, "ATF 最終収束ビームラインの高度化に向けたウェイク場低減効果の定量的評価", 第 21 回日本加速器学会, FRP088, Yamagata (2024).
- [19] Y. Abe *et al.*, "ウェイク場低減に向けた ATF 最終収束ビームラインの高度化", 第 22 回日本加速器学会, FRP015, Tokyo (2025).
- [20] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [21] T. Okugi *et al.*, "KEK 先端加速器施設(ATF)におけるナノビーム技術開発", 第 21 回日本加速器学会, TFSP18, Yamagata (2024).
- [22] M. Kurata, "Machine Learning at KEK", LCWS2024.