

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

奥木敏行^{#, A,B)}, 阿部優樹^{A)}, 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)},
クルーチニン コンスタンティン^{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)}, 森川祐^{A)}
Toshiyuki Okugi^{#, A,B)}, Yuki Abe^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Alexander Aryshev^{A,B)}, Kiyoshi Kubo^{A,B)},
Masakazu Kurata^{A)}, Kruchinin Konstantin^{A,B)}, Shigeru Kuroda^{A,B)}, Nobuhiro Terunuma^{A,B)},
Takashi Naito^{A)}, Eiji Nakamura^{A,B)}, Masafumi Fukuda^{A,B)}, Popov Konstantin^{A)}, Yu Morikawa^{A)}

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

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

Abstract

The Accelerator Test Facility (ATF) has been developing the nanobeam technologies required for the International Linear Collider (ILC) based on the ATF international collaboration. The ATF has a damping ring that can produce the low-emittance beams required for the ILC and an ATF2 beamline that can focus the low-emittance beams damped by the ATF damping ring to nanometer-small beams. The ATF2 beamline is a test beamline designed to develop beam focusing and beam control techniques required for the ILC. The ATF2 beamline also has with beam diagnostic devices for nanometer ultra-small beams, such as 20-nm position-resolution cavity BPMs and a beam size monitor to measure the nanometer ultra-small beam by utilizing the laser interference fringe. KEK-ATF is the facility suitable not only for the ILC beam focusing technology development, but also for a wide range of research on nanometer ultra-small beam. In recent years, ATF has been conducting research and development focusing on the three major topics of nanobeam focusing, stable operation of nanobeams, and nanobeam measurement technology. The ATF is also important for the development of the beam delivery system (BDS) of the ILC technology network (ITN). We will continue to develop comprehensive nanometer technology, including the ITN, based on the ATF international collaboration.

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。光陰極型高周波電子銃で生成された電子ビームは S-band 線型加速器で 1.3 GeV まで加速され、ダンピングリングに送られる。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]、ダンピングリングから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れたことができて [4-6]。その結果として、ATF2 ビームラインと同じく ILC でも採用されている 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た。

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]。

[#] toshiyuki.okugi@kek.jp

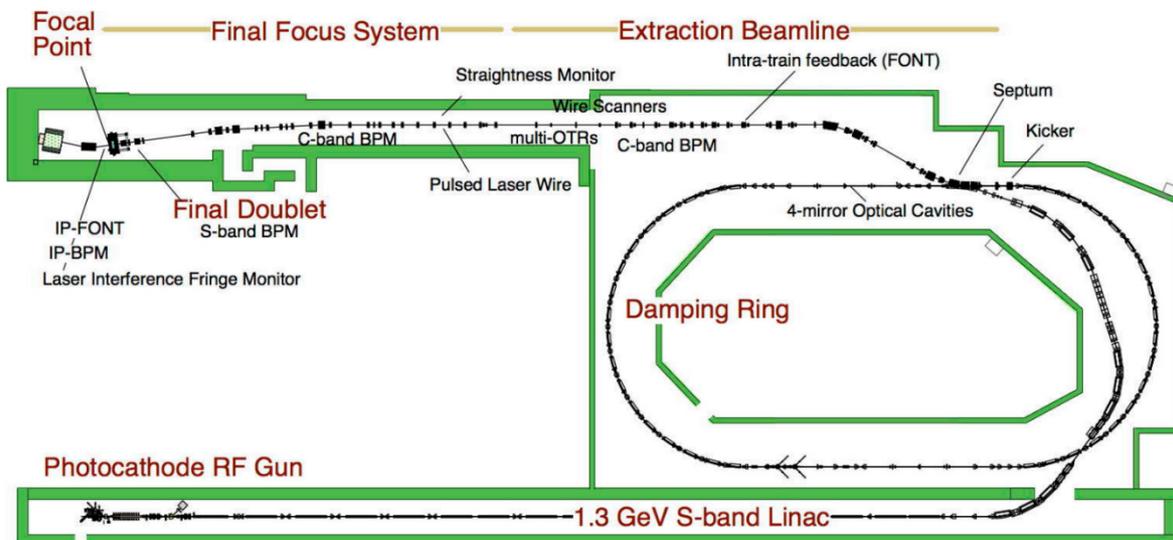


Figure 1: Schematic layout of the Accelerator Test Facility (ATF).

その後も国際的に ILC の実現に向けた検討は進められ、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]。ATF は世界最高水準の低エミッタンスビームの利用が可能であり、加速器の運転時間の全てを加速器の研究に充てられるので、世界の中でも先端加速器の研究に最適な加速器の 1 つである。それらの流れの中で 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、その中には ATF3 計画が主要な交流事業として計上されている。昨年度から COVID-19 による日本への入国規制に伴い暫くおこなわれなかった海外の研究者による ATF でのナノビーム開発研究が再開された。昨年度の所属機関別の ATF への来訪者の延べ人数を Fig. 2 に示す。このような海外の研究機関からの要望に応えるため、今年度は運転時間を昨年度の 14 週間から年間 20 週間に増加した。このように ATF では国際協働による先端加速器技術の開発が現在精力的におこなわれている。

2023年度 所属機関別集計 (海外)

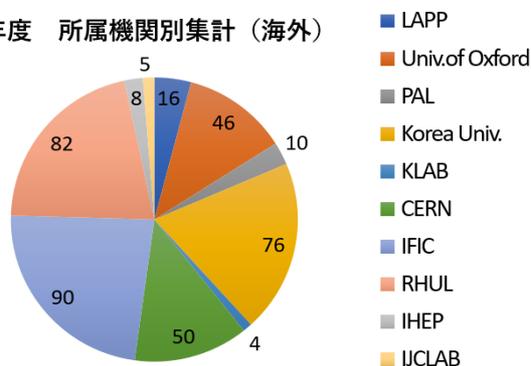


Figure 2: Statistics on the number of overseas visitors to the ATF in JFY2023. Numerical values are in person-days.

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、建設当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おり (Fig. 3)、電子ビームによる安定性の向上が確認も進めている[15,16]。

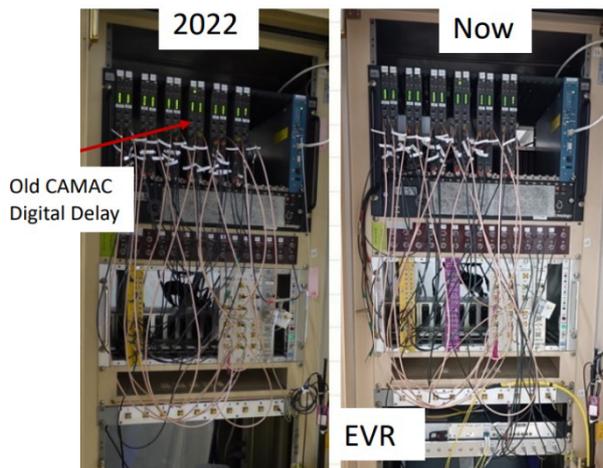


Figure 3: Updated ATF2 timing system [13].

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による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ェ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。昨年度は ATF2 ビームラインを通した Wakefield のビームへの影響のモデル化を進めた。ATF2 ビームライン全体での動的な Wakefield のビームへ影響を Fig. 4 に示す[17]。ビームへの影響が最も大きなものは空洞型ビーム位置モニターであり、次に大きなものは ICF フランジのギャップであることがわかった。ICF フランジのギャップによる Wakefield は単体では小さいが、ビームライン全体でみると数が多いため影響が無視できなくなる。

そこで、今年春の運転では 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 の影響を調べた。その結果は[18]で詳しく説明しているので、そちらを参照頂きたい。

このように ATF2 ビームラインでは Wakefield のナノメートル極小ビームへの影響を精密に研究している。

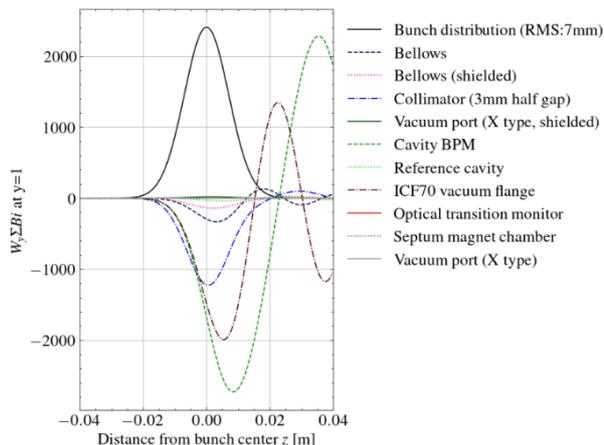


Figure 4: The dynamic Wakefield effect evaluation through the entire ATF2 beamline [16].

4.2 多重極磁場による収差の補正の高度化

ATF2 ビームラインの収束点では電子ビームをナノメートルスケールまで収束するので、ATF2 ビームラインでは微細な電磁石の多重極誤差のビームへの影響が顕著になる。このこともナノメートル極小ビームの使用可能な ATF2 ビームラインの大きな特徴である。

ナノメートル極小ビームへの多重極磁場の影響を抑えるためには多重極磁場誤差が少ない電磁石を使うことが重要である。しかし、ATF2 ビームラインの最終収束電磁石 QD0FF は SLAC で FFTB 実験[19]に使われていた古い電磁石を改良して使用していた。更に、この電磁石はコイルから水漏れを起こしたことがあり、その際に、他の電磁石のコイルを付け変えて使用していたものである。電磁石磁場の信頼性を担保するため、新たな最終収束電磁石 QD0FF を昨年作成して、本年初めに電磁石の更新をおこなった (Fig. 5)。

ATF2 ビームラインでは二次のオプティクス補正にスキュー六極電磁石 4 台をビームラインに入れて使用している。昨年まで使用していた電磁石は KEKB の時に使われていた古い電磁石を改良して使用していた。そのため、磁場の精度が悪く、四極磁場の磁場中心に磁石中

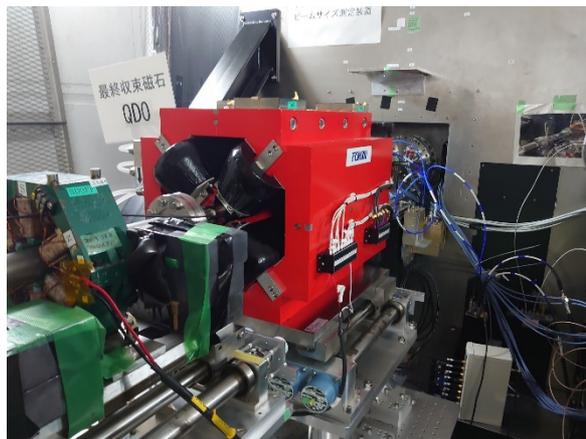


Figure 5: The new QD0FF magnet. This magnet was installed to the ATF2 beamline at the beginning of 2024.



Figure 6: New skew sextupole magnets. These magnets were installed to the ATF2 beamline on May 2024.

心位置に合わせても偏向磁場が生じてしまい、電磁石の強さを変えるとビーム軌道に変化が生じてしまっていた。

そのため、スキュー六極電磁石を使った二次のオプティクス補正の際には、その結果生じるビーム軌道の変化に伴う線形オプティクスの補正も同時におこなわなければならない。この問題を解消するため、本年 5 月にスキュー六極電磁石 4 台を更新した (Fig. 6)。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 ビームラインの線形オプティクス補正は 5 台の六極電磁石の位置を電磁石ムーバーで精密に動かすことが重要である。ムーバーに要求される位置精度は $1\mu\text{m}$ 程度と非常に厳しい。ATF2 ビームラインで使用している電磁石ムーバーシステムは 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。そこで、今後のメンテナンスも考慮して、制御回路を順次更新していくことにした。昨年度は最も重要な六極電磁石 5 台分のムーバー制御回路を作成し、本年 5 月に ATF2 ビームラインの六極電磁石ムーバーの制御回路の更新をおこなった (Fig. 7)。今後は他の四極電磁石ムーバーの制御回路の更新も順次進めていく予定である。

4.3 最新加速器技術による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。これまで続けてきたダンピングリングへの電子ビームの入射効率の最大化や ATF2 収束



Figure 7: New skew magnet mover controller. The magnet controllers for the ATF final focus sextupoles were replaced to the new controllers on May 2024.

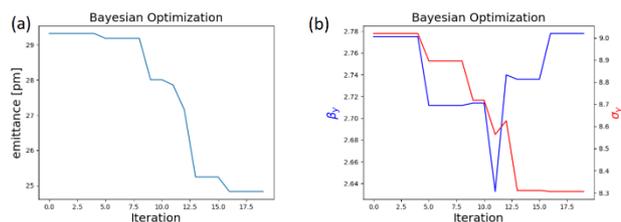


Figure 8: Results of the emittance optimization by the machine learning in the ATF damping ring. (a) vertical emittance as a function of iteration. (b) XSR beamsize and the beta function as a function of iteration.

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に加えて、本年度は新たに機械学習を取り入れたダンピングリングでのエミッタンス調整を始めた [20]。ATF ダンピングリング内の全ての六極電磁石にはスキュー四極磁場を生成できる補正コイルが巻かれており、機械学習によりリング全体を通した最適なトリム磁場の探索がおこなわれた。エミッタンスの評価には XSR モニターによるビームサイズ測定と BPM の複数ターンの情報を使った β 関数測定の情報と同時に使った。結果を Fig. 8 に示す。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 年度の ATF の運転時間は 2023 年度の 14 週間から 20 週間に増加した。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、2023 年度から 2024 年度にかけて、タイミングシステム、最終収束電磁石 QD0FF、六極電磁石ムーバーの更新などをおこなった。また、磁場精度が良くなかったスキュー六極電磁石 4 台の更新をおこなった。ATF におけるナノビーム開発は、ITN での開発の主眼となる 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おこなっています。

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] T. 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] A. Aryshev, "ATF2 status and operation 2023-2024", LCWS2024.
- [15] K. Popov *et al.*, 第 21 回日本加速器学会, FRP013, Yamagata (2024).
- [16] K. Popov *et al.*, 第 21 回日本加速器学会, FRP072, Yamagata (2024).
- [17] Y. Abe, "Evaluation of 6 effects to nanometer small beam", Ph.D thesis of SOKENDAI (2024).
- [18] Y. Abe *et al.*, 第 20 回日本加速器学会, FRP088, Yamagata (2024).
- [19] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [20] M. Kurata, "Machine Learning at KEK", LCWS2024.