

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}, 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}, 森川祐^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

Toshiyuki Okugi^{#, A,B}, 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}, Yu Morikawa^A, Yuki Abe^B, Popov Konstantin^B,
and the ATF International Collaboration^C

^A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

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

Abstract

The Accelerator Test Facility (ATF) has been developing the nanobeam technologies required for the International Linear Collider (ILC). At the ATF, 41 nm of beam size has been achieved, and the development of nanometer position control technology at focal point of the ATF2 beamline has also demonstrated with the intra-pulse feedback to stabilize the beam position variation within an acceptable level. The kick-off meeting of the ATF upgrade plan (ATF3 project), which is an extension of the ATF2 project, was held in March 2023 as a new framework to promote research along the ILC Technical Network (ITN) in nanobeam technology. In June 2023, nanobeam technology development at ATF by overseas researchers restarted after COVID-19. We will continue to develop comprehensive nanometer technology 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、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) を建設運用している。STF と CFF では超伝導加速技術開発をおこない、ATF では ILC に要求され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。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 の繰り返しで生成できる。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。ダンピングリング下流には最終収束ビームラインがあり、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。

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 ATF の Phase-2 として位置づけられ、ATF2 計画と呼ばれ、建設された最終収束ビームラインのことを ATF2 ビームラインと呼んでいる。ATF2 の運用は 2009 年から始まっており[3]、ATF2 計画において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おこなわれている。

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をほぼ検証している。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化させる高速フィードバック技術が実証されている[4,5]。

その後も ILC の実現に向けた検討は国際的に進められており、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。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) に向けた準備をおこなっている。IDT では 2021 年 5 月に ILC 準備研究所ができる前に始めるべき

[#] toshiya.okugi@kek.jp

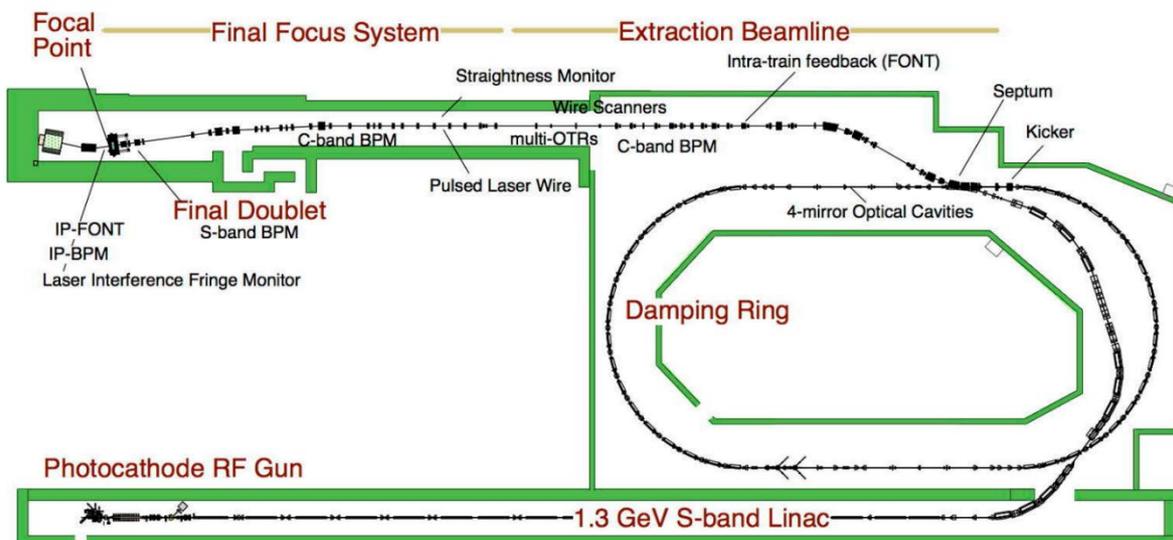


Figure 1: Schematic layout of the Accelerator Test Facility (ATF).

18 項目からなる加速技術開発項目(work package, WP)をまとめ[6]、2022 年 3 月には、これらの WP のうち、より時間的に早く開始することが望ましい加速技術開発項目として Time-critical WP をまとめた[7]。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[8]。

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[9]。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。それらの流れの中で、2023 年 6 月には COVID-19 による日本への入国規制に伴い暫くできていなかった海外の研究者が直接 ATF に訪れてのナノビーム開発研究が再開された。

3. これまでのナノビーム技術開発

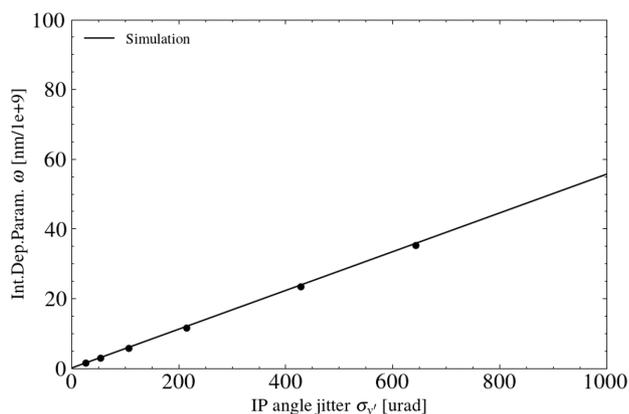
リニアコライダーに対する最終収束システムの試験としては、1990 年代に SLAC の Final Focus Test Beam (FFTB) において Global Chromaticity Correction という収差補正方法の収束試験がおこなわれ、垂直方向 70 nm のビームサイズが確認されていた[10,11]。一方、現在の ILC 設計では当時とは異なる Local Chromaticity Correction 方式が採用されている。この方式では Global 方式と比べて最終収束システムの長さを約 1/3 の 700 m に短縮でき、最終収束磁石から焦点までの距離を長くすることができるなどの大きなメリットがある[12]。

ATF2 ビームラインは、ILC の最終収束システムと全く

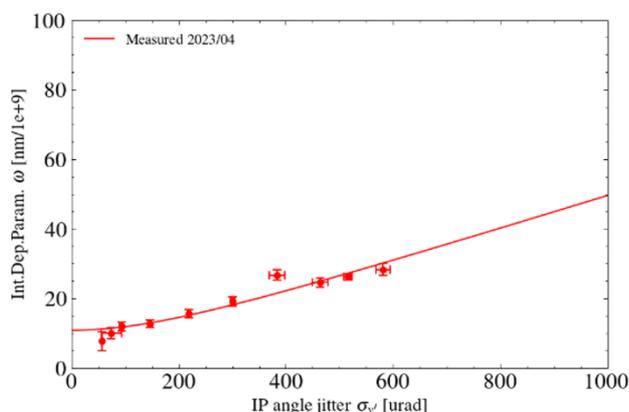
同じ電磁石構成のビームラインになっており、電磁石の磁場の誤差の許容値も ILC と同程度になるように設計されている。ATF2 計画には二つの重要な技術開発目標がある。一つは ILC での衝突ビームサイズを実現するための最終ビーム収束技術、もう一つはその極小ビームを衝突点で安定に衝突させるために必要なナノメートルレベルでの位置制御技術である。ILC の電子・陽電子ビームは、それぞれ衝突点で垂直方向 8 nm 程度に絞られて衝突する。その相対的位置の安定性は重要であり、衝突点において 2 nm 程度に安定化することが求められている。そのようなビーム位置の安定度を実現するために高速フィードバック技術が重要となる。

ATF2 ビームラインでの最終ビーム収束技術の研究においては高次収差補正が重要であり、高次収差の補正には六極電磁石およびスクュー六極電磁石が使われる[13]。ATF2 ビームラインでは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き、2012 年に初めて 100 nm の壁を越え[14]、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 を確認するに至り、目標の 37 nm と遜色ない値を実現した[15]。ILC 最終収束ビームラインでも ATF2 ビームラインと全く同じ高次収差の調整方式を採用することになっているので、ILC で採用する Local Chromaticity Correction 方式の最終収束システムや、その調整方式が十分に機能することを実証したものと判断している。

ナノメートルレベルでの位置制御技術に関しては、ILC では超伝導加速空洞を活用した長パルス加速方式を利用することで焦点でのビームの位置を安定させることを考えている。ILC のビームは 1312 個のバンチを 554 ns 間隔に並べたバンチ列を 1 パルスで加速する構成になっている。このように ILC のビームのバンチ間隔は長いので、バンチ列内のバンチの位置を補正するため



(a) Wakefield simulation



(b) Wakefield measurement

Figure 2: IP beam size change due to wakefield when IP angle jitter is created by utilizing external jitter sources [17].

の時間が充分にある。一方で、ビーム位置を乱す要因となる地盤振動などの周期(応答時間)は ILC のバンチ間隔に比べて充分長いので、先行バンチの位置と後続バンチの位置との関係に与える影響は少なく、バンチ列内の各バンチは直前のバンチとほぼ同じ軌道をとることになる。そこで、ILC ではバンチ列の先行バンチの位置を検出して後続のバンチ群の位置を補正する Intra-train feedback が提案され、その開発が進められてきた。ATF 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すことができる。ATF では、このバンチ列を使うことで ILC に必要となる Intra-train feedback の試験を行ってきた。その結果、約 1 nm 程度の収束点でのビーム位置安定度に相当するビームの安定化が実証された[16]。フードバック装置は ATF2 ビームライン上流部に置かれ、使用した機器は Stripline BPM、高速演算回路、Stripline Kicker と ILC と同じ構成となっている。ATF で試験開発されたフードバック装置は、位置の安定度が高いだけでなく、先頭バンチの位置検出から次のバンチを補正するまで Feedback 応答時間に関しても 133 ns という応答時間が達成された。これは ILC で想定するバンチ間隔 554 ns と比べても充分速く、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の可能性も見込まれる。

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ビームのキックによる僅かな位置の違い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、ビームライン全体の 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。

ATF2 ビームラインは収束点でビームをナノメートル極小ビームに絞るため、ビームラインを通してベータ関数は非常に大きく、そこに置かれた Wakefield 源が収束点でのビームサイズに与える影響も大きくなる。また、収束点からそれぞれの Wakefield 源までの位相進捗度は 180 度の半整数倍になっているものが殆どである。そのため収束点での角度ジッターは Wakefield 源での大きな位置の変位を生み出し、それらの影響は足し合わされることになる。収束点でのビームサイズに対する Wakefield の影響はビーム強度に比例するので、焦点での角度ジッターの大きさに対するビーム強度依存性を測定すれば、ビームライン全体での Wakefield の影響を調べることが出来る。そこで、収束点でのビームの角度ジッターの振幅を任意に変化させることが出来るジッター源をビームライン上流に設置して、ビームライン全体の Wakefield モデルと実際のビームへの影響を比較することにした。ATF2 ビームラインの収束点で角度ジッターを変えたとき Wakefield モデルから推定したビームサイズのビーム強度依存性の変化のシミュレーション結果を Fig. 2 (a) に示した。更に、実際の ATF2 ビームラインで測定したジッター源の強さを変えたときのビーム強度依存性の変化を Fig. 2 (b) に示した。両者は非常に良い一致を示している。Figure 2 に示した測定結果は、[17]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。

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電磁石の多重極磁場誤差の影響も強く受ける。このような微細な磁石の多重極誤差の影響を強く受けることもナノメートル極小ビームを

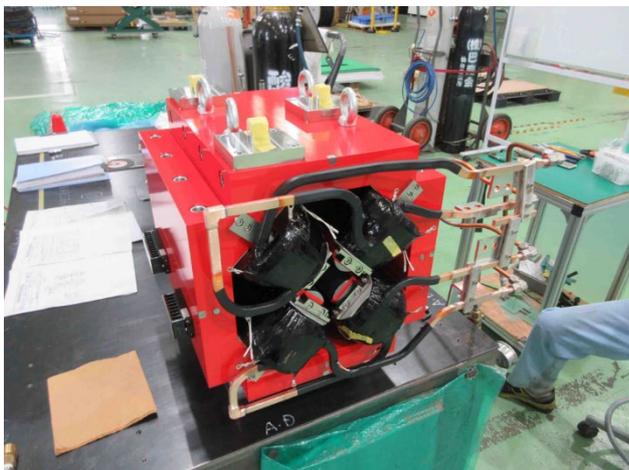


Figure 3: Updated ATF2 final focus magnet.

実現できる ATF2 ビームラインの大きな特徴になる。

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なのだが、ATF2 ビームラインの最終収束電磁石は以前コイルから水漏れが起こり、他の電磁石のコイルに付け変えたものを使っているため、電磁石磁場の信頼性を担保するために更新することにした (Fig. 3)。

一方で、ビームを使って多重極磁場の影響を調べることも同時に進めている。ATF2 収束点にはレーザー干渉縞型ビームサイズモニターが設置されている (Fig. 4)。電子ビームの収束点にレーザー光の干渉縞を作り、電子ビームに対してレーザー干渉縞の位置を動かしながら、干渉縞での光子と電子ビームの逆コンプトン散乱 γ 線数の変化 (Modulation) の大きさを測定することで、電子ビームのビームサイズを測定することが出来る。

干渉縞がビーム水平面に平行に作られるため、ATF 収束点に置かれたビームサイズモニター (IP-BSM) で測定されるビームサイズは、測定されるビームサイズは垂直方向に射影されたビームサイズとなる。

そこで、干渉縞を回転させるために、上下方向のそれぞれのレーザー光路上のミラーの位置を平行に移動させるステージを導入した。このステージを使って収束点

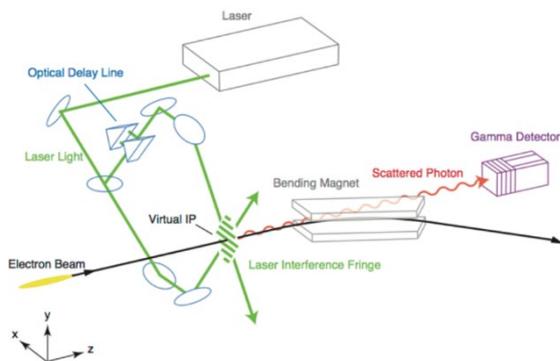


Figure 4: Schematic figure of the IP beam size monitor (IP-BSM) at ATF2 virtual interaction point [18].

へと向かうレーザーの角度を遠隔操作できるようにしたことで、干渉縞の tilt 角を簡単に変えることが可能になった。干渉縞の tilt 角を変えながらビームサイズを測定することで、電子ビーム自体の tilt やビームの非線形な歪みをビームの条件を変えながら測定することが容易になった。その一例を Fig. 5 に示す。2023 年 6 月 27 日のデータではビームの形状が楕円形状であるときに予想される tilt スキャンの幅よりも実際に測定された tilt スキャンの幅が広がっていたため、収束点でのビームが楕円形状から何らかの歪みが生じてしまっていたことが示唆された。そこで、取り出しキッカーの強さを変えてセプタム磁石を通る軌道を変えて同じ測定をした 6 月 30 日のデータでは、実際に測定された tilt スキャンの幅はビームの形状が楕円形状の時に予想される tilt スキャンの幅に近くなった。ビームのセプタム磁石での軌道のみを変えた 2 つの測定結果から、セプタム電磁石の多重極磁場の影響から AT2 ビームラインの収束点でビームに非線形な歪みが生じていることがわかった。

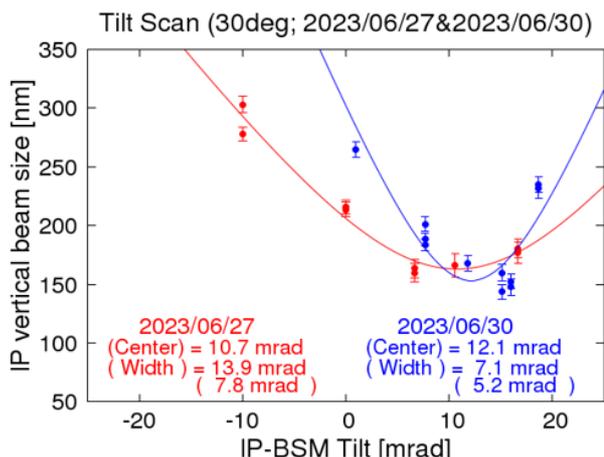


Figure 5: Schematic figure of the IP beam size monitor (IP-BSM) at ATF2 virtual interaction point.

このように ATF2 ビームラインでは電磁石の多重極磁場誤差の影響を抑えるために必要とされる電磁石の更新と、ビームを使った非線形磁場の影響の削減の両方の角度から多重極磁場による収差の補正の高度化を進めている。

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[19]。機械学習を取り入れたビーム調整の例として、ダンピングリングへの電子ビームの入射効率を最大化するためのクライストロン位相の最適化と、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の例を示す。

ATF 入射器では 8 台のクライストロンと 16 本の加速管を使って、電子ビームを 80 MeV から 1.3 GeV まで加速している。この 8 台のクライストロンの位相を機械学習によるアルゴリズムで最適化してダンピングリングへの入射効率の最大化をおこなった。結果を Fig. 6 (a) に示す。約 20 回の試行のあと、ダンピングリングへの入射効率を最大化するパラメータを見つけ出すことができた。

ATF2 ビームラインでは収束点でのビームサイズを最

小化するために 5 台の六極電磁石の位置を電磁石ムーバーに乗せ、電磁石の位置を移動させることでビームの線形パラメータを変えている。このとき各電磁石の位置を適切な関係に従って同時に移動させることで、ビームウエストの位置、dispersion 関数、x'-y カップリングの 3 つの線形パラメータを独立に変化させることが出来る仕組みを採用している。機械学習によるアルゴリズムで、この 3 つの線形パラメータを調整する調整ノブを最適化することで ATF2 収束点でのビームサイズの最小化をおこなった (Fig. 6 (b)). 約 15 回の試行で最適値が見つけていることがわかる。

ATF 加速器では機械学習をナノメートル極小ビームの調整に取り入れ始めており、このような試みは今後も推進していく予定である。

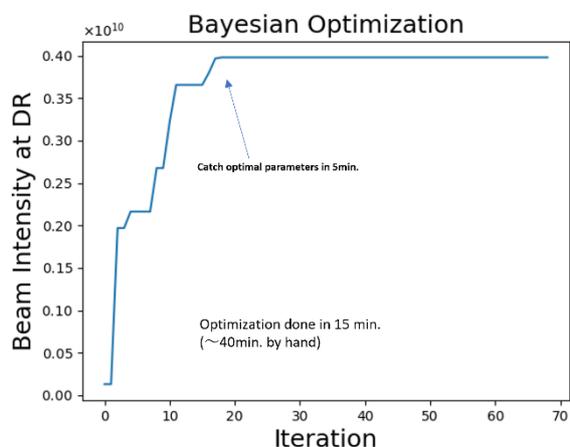
5. まとめ

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化

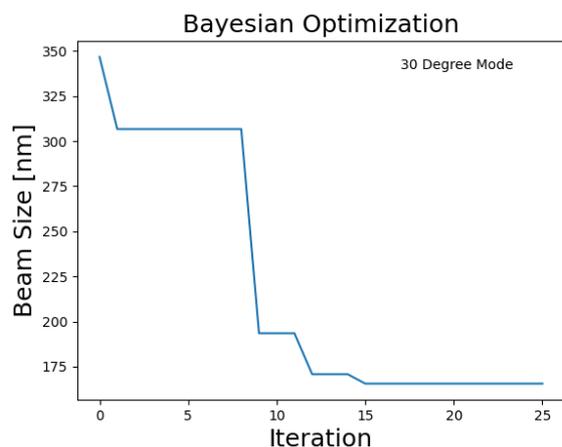
させる高速フィードバック技術の実証が行われた。最近の研究動向としては ILC Technical Network (ITN) に沿ったナノビーム開発研究を推進するための新たな枠組みとして ATF2 計画を発展させた ATF 高度化計画(ATF3 計画)の kick-off ミーティングが 2023 年 3 月に開かれ、2023 年 6 月には COVID-19 による日本への入国規制に伴い暫くできていなかった海外の研究者による ATF 加速器を使ったナノビームの研究が再開された。ATF2 ビームラインは 100 nm 以下のビームサイズの極小ビームを唯一生成して、それを計測できるビームラインであるため、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。ATF におけるナノビーム開発は、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。

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] ATF Review;
<https://agenda.linearcollider.org/event/8626/>
- [5] The ATF collaboration, "ATF Report 2020",
https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf
- [6] 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
- [7] IDT-WG2, "Time-critical WPs for the ILC construction",
https://agenda.linearcollider.org/event/9649/attachments/38003/60567/Time-Critical_WPsV8b.pdf
- [8] KEK and IDT, "Framework for the ILC Technology Network",
https://www2.kek.jp/kokusai/IDT/ITN_Framework20230602.pdf
- [9] <https://indico.cern.ch/event/1259176/>
- [10] V. Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [11] T. Shintake, NIM A 311, 455 (1992).
- [12] P. Raimondi and A.Seryi, Phys. Rev. Lett. 86, 3779 (2001).
- [13] T. Okugi *et al.*, Phys. Rev. ST-AB 17, 023501 (2014).
- [14] G. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- [15] T. Okugi and ATF international collaboration, Proceedings of LINAC2016, MO3A02 (2016).
- [16] P. Burrows *et al.*, Proceedings of IPAC2014, TUPME009 (2014).
- [17] Y. Abe *et al.*, 第 20 回日本加速器学会, WEOB15, Funabashi (2023).
- [18] T. Suehara *et al.*, NIM A 616, 1 (2010).
- [19] M. Kurata, "Beam Tuning for ATF/ATF2 using Machine Learning", LCWS2023.



(a) Linac klystron phase optimization



(b) IP beam size tuning knob optimization

Figure 6: Parameter optimization with Machine Learning at ATF accelerator.