

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 UPGRADE OF THE ATF FINAL FOCUS BEAMLIN TO MITIGATE WAKEFIELD EFFECTS ON THE NANOMETER SMALL BEAM

阿部優樹 ^{*,A,B)}, 久保浄 ^{A,B)}, 奥木敏行 ^{A,B)}, 照沼信浩 ^{A,B)}
Yuki Abe ^{*,A,B)}, Kiyoshi Kubo ^{A,B)}, Toshiyuki Okugi ^{A,B)}, Nobuhiro Terunuma ^{A,B)}
A) KEK

B) The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

Abstract

The KEK-ATF (Accelerator Test Facility) was constructed as an R&D facility for the final focus system to develop the nanometer beam technology required for the ILC (International Linear Collider). ATF is the best research environment for the study of wakefield effects on the nanometer small beam. The vertical beam size growth as a function of the bunch intensity was observed at the focal point (IP), which is mainly caused by wakefield. In particular, vacuum flanges and cavity BPMs located in regions of large beta functions have a strong impact on the nanometer small beam. To mitigate these effects, vacuum components in the final focusing beamline were upgraded to reduce impedance. Vacuum flanges and beam pipes near CBPMs were replaced with step-less structures, while bellows and vacuum ports were redesigned with smooth inner surfaces and integrated RF shields. Additional RF shields were installed on some ICF70 and ICF114 flanges. The wakefield mitigation effects of these upgrades was evaluated using both analytical methods and macro particle tracking simulations. This report shows the evaluation results and the current status of the beamline upgrade.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の先端加速器試験施設 (ATF) [1] では国際リニアコライダー (ILC) [2] において必要とされるナノメートル極小ビーム (極小ビーム) を安定に実現するためのビーム制御、計測技術の研究開発が行われている [3]。ダンピングリングにて生成された高品質な低エミッタンスビーム [4,5] は最終収束ビームライン [6] (Fig. 1) へ出射され、収束点 (IP) にて最小となる。ATF の目標鉛直ビームサイズは ILC の設計値 (250 GeV, 7 nm) に相当する 37 nm である。2016 年には 41 nm を達成し、最終収束技術の有効性は概ね実証された [7]。

一方で、ATF ではバンチ強度の増加に伴い IP でのビームサイズが増大する現象が観測されている。その主因はウェイク場であるとされており [8]、特に、 β 関数の大きな区間に設置された真空フランジや空洞型 BPM などが極小ビームに大きな影響を与えることが示されている [9]。安定な極小ビーム実現には、ウェイク場の影響を詳細に調査することは重要な研究課題である。ATF は低エミッタンスかつナノメートルサイズの高品質なビームの生成が可能な加速器とビームの位置とサイズを精密に測定可能である高精度なモニター [10-12] を有することから、極小ビームに対するウェイク場の影響を詳細に研究できる理想的な研究環境であると言える。

本研究ではウェイク場の影響を低減するため、真空機器の低インピーダンス化による最終収束ビームラインの高度化を実施した。特に、ビームに対する影響が大きい区間の真空フランジやベローズを、ビームから見て滑らかな内面形状を持つ真空機器に優先的に交換した。本報告では、これらビームライン高度化の進捗

と期待されるウェイク場低減効果の評価結果について述べる。

2. ウェイク場とビームの運動

ウェイク源の構造中心からズレた位置をビームが通過すると横方向ウェイク場によるキックが作用する。バンチ中心からの距離を z とすると、ある位置 z における単粒子に作用するウェイク場のキックは、その角度変化 $\Delta y'(z) = eq W_y(y_m, z)/E$ として表すことができる。ここでビームエネルギー E 、バンチの総電荷量 q 、電子の電荷量 e とした。 $W_y(y_m, z)$ はウェイクポテンシャル [13] と呼ばれ、近似的に全ての粒子が $(x, y) = (0, y_m)$ をビームラインと平行に、あるウェイク源の入口 s_1 から出口 s_2 まで通過すると仮定した場合のウェイクポテンシャルを Eq. (1) に示す。 $E_y(x, y, s, t)$ および $B_x(x, y, s, t)$ は励起された電磁場、 q は総電荷量、 c は光速を表す。時間 t と $ct = s + z$ という関係がある。

$$W_y(y_m, z) = \frac{1}{q} \int_{s_1}^{s_2} [E_y(0, y_m, s, t) + cB_x(0, y_m, s, t)] ds \quad (1)$$

IP におけるウェイク場によるバンチのビームサイズ増大は以下のように表すことができる [9]。

$$\Delta \sigma_y^2 = \left(\frac{eq}{E} \sqrt{\beta_y^*} \right)^2 \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_i W_{y,i}(y_{m,i}, z) \sqrt{\beta_{y,i}} \sin \Delta \phi_i \right\}^2 \lambda(z) dz - \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \sum_i W_{y,i}(y_{m,i}, z) \sqrt{\beta_{y,i}} \sin \Delta \phi_i \lambda(z) dz \right\}^2 \right] \quad (2)$$

* abeyuki@post.kek.jp

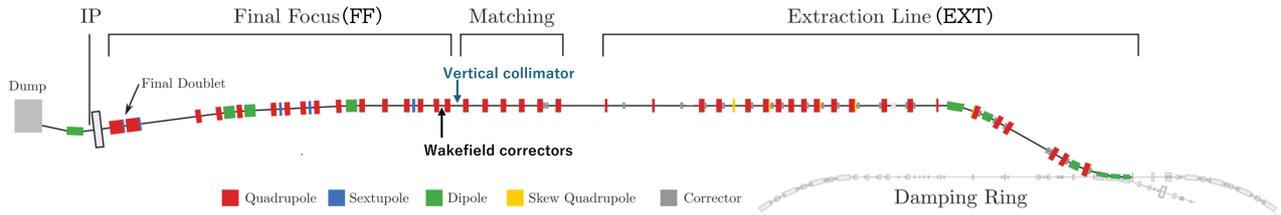


Figure 1: The layout of extraction (EXT) and final focus (FF) beamline [6].

ここで $\lambda(z)$ はバンチの電荷分布を表し、 $\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(z) dz = 1$ を満たす。ここで、IPにおけるベータ関数を β_y^* 、EXT ビームライン入口から i 番目のウェイク源の地点でのベータ関数を $\beta_{y,i}$ 、そのウェイク源から IP までの位相進度を $\Delta\phi_i$ とした。 E はビームエネルギーである。

3. ATF ビームラインにおけるウェイク源と極小ビームに対する影響

Equation (2) から軌道揺らぎに起因する極小ビームに対する各ウェイク源の影響度を以下のように解析的に見積もることができる [14].

$$\Delta\sigma_{y,j} \propto W_{y,j}(0, 1 \text{ mm}, z) \sum_i \beta_{y,j,i} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{y,j}$ はある特定のウェイク源のみ考慮した場合の IP ビームサイズの増加量を示し、インデックス j によりウェイク源の種類を区別している。 $W_{y,j}(0, 1 \text{ mm}, z)$ はオフセット $y_m = 1 \text{ [mm]}$ の時のあるウェイク源のウェイクポテンシャルである。

Table 1 に ATF 最終収束ビームライン (Fig. 1 FF) と取り出しビームライン (Fig. 1 EXT) に設置されているウェイク源とその設置数を示す。先行研究ではこれら全てのウェイク源を考慮したウェイク場モデルを構築し、極小ビームに対する影響評価を行った [9]。Equation (3) に基づいて各ウェイク源の極小ビームに対する影響度を評価した結果を Fig. 2 に示す。

ICF70 フランジや空洞型 BPM (CBPM) の影響が大きいことが分かる。Figure 3 に ATF-EXT・FF ビームラインのビーム光学系を示す。FF ビームラインの β 関数は EXT ビームラインの β 関数よりも大きいため、その区間に設置数の多いウェイク源 (ICF70 フランジや CBPM) の影響が大きくなる。

4. ウェイク場低減のための真空機器の低インピーダンス化

ウェイク場の影響を低減するため、本研究では最終収束ビームラインに設置されている真空機器の低インピーダンス化に取り組んだ。特に、ビームに対する影響が大きい β 関数の大きな区間 (Fig. 3 中①、②) に設置されている真空機器を優先的に交換した。

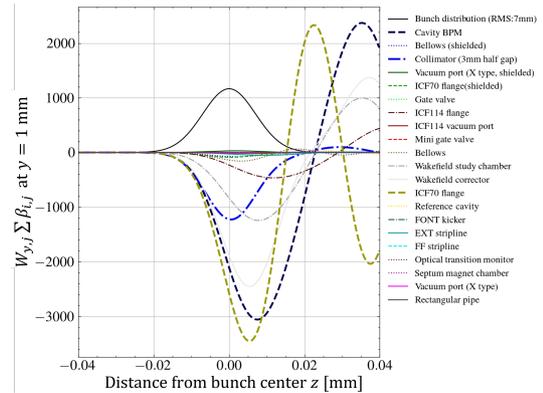


Figure 2: Analytical estimation of the wakefield effects of each type of wakefield sources with orbit fluctuation to the beam size. Horizontal axis: the distance from bunch center, vertical axis: the impact of the wakefield kick on the beam size as $W_{y,j}(0, 1, z) \sum_i \beta_{y,i,j}$ [9].

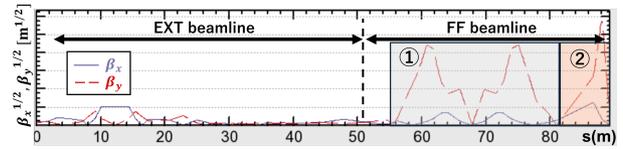


Figure 3: Beta function at the ATF nominal 10×1 optics.

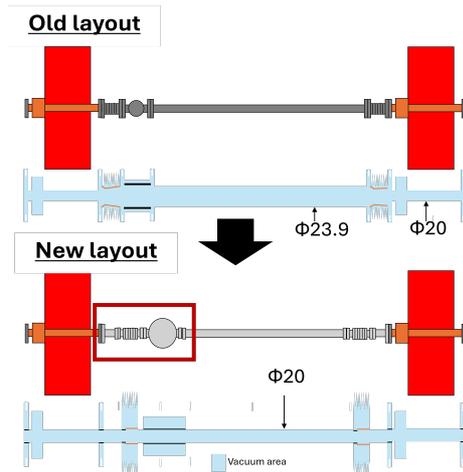


Figure 4: Schematic view of the ATF-FF beamline internal structure before and after upgrade for wakefield mitigation.

Table 1: Wakefield Sources in ATF EXT and FF Beamline

Name	Location	Amount
Vacuum Port	EXT	15
Bellows	EXT	34
Optical Transition Radiation Monitor	EXT	4
Septum magnet chamber	EXT	3
Stripline BPM	EXT	12
Stripline kicker	EXT	2
Rectangular chambers	EXT	4
Vacuum Flange (ICF70)	EXT, FF	223
Reference Cavity	EXT, FF	2
Cavity BPM (CBPM)	EXT, FF	25
Gate valve	EXT, FF	3
Stripline BPM	FF	1
Shielded Vacuum Flange (ICF70)	FF	20
Shielded Bellows	FF	34
shielded Vacuum Port	FF	13
manual gate valve	FF	1
Collimator	FF	1
Wakefield corrector	FF	1
Wakefield Study chamber	FF	1
Vacuum Flange (ICF114)	FF	12
Vacuum Port (ICF114)	FF	2



Figure 5: Vacuum components installed in the ATF-FF beamline after upgrade.

Figure 4 に区間①の改造前後のビームラインの内部形状の模式図を示す。また Fig. 5 に新たに導入した真空フランジ、ベローズ、真空排気ポートを示す。従来のビームラインではフランジ接続部や CBPM 前後のビームパイプ内径差により段差が生じていた。これに対し、本研究では Fig. 6 に示すような接続部に段差ができない構造の真空フランジに交換、ビームパイプ内径を 20 mm に統一することでウェイク場発生の原因となる段差を解消した。一方、CBPM の両側は ICF70 フランジであるため、この段差レスの真空フランジを直接取り付けることはできなかった。そこで ICF70 フランジと段差レスの真空フランジで構成された変換パイプを用意した。変換パイプの ICF70 フランジ側の端面を追加加工し、挿入型 RF シールドを取り付けることにより ICF70 フランジ接続部の段差を解消した。この RF シールドの有効性は既に先行研究で示されている [15]。ベローズや

真空排気ポートに関しては挿入型の RF シールドを取り付けて段差を解消していたが、ベローズの RF フィンガーに関しては Fig. 7 に示すようにパイプ内側に突き出す構造であった。そこでフランジ改修に合わせて、ベローズおよび排気ポートについてもより滑らかな内面形状を持つ新規設計品へと更新し、RF シールド一体型の構造とした。Figure 8 に新たに導入したベローズの内部の構造を示す。



Figure 6: Step-less vacuum flange with smooth inner structure installed for wakefield mitigation.

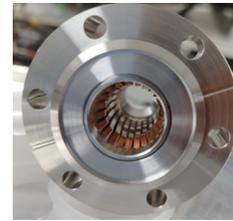


Figure 7: Vacuum bellows with insert-type RF shield before upgrading. Protruding finger contacts.

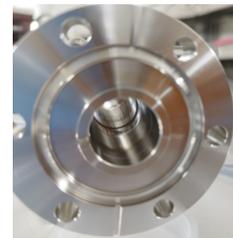


Figure 8: Upgraded vacuum bellows with integrated RF shield and smooth inner structure for wakefield mitigation.

Figure 9 に区間①の改造前後のレイアウトを示す。真空フランジの交換に伴い、14 箇所ビームパイプを交換した。本研究で実施した改修内容を以下にまとめる。

- 35 個の ICF70 フランジを撤去
- 30 個の ICF70 フランジに RF シールドを追加
- 12 個の ICF114 フランジに RF シールドを追加
- 19 個のベローズを交換
- 5 個の真空排気ポートを交換
- 内径差による段差を 17 箇所解消

これにより区間①のビームライン内部形状の連続性は大幅に改善された。さらに、Fig. 3 ②の区間に設置され

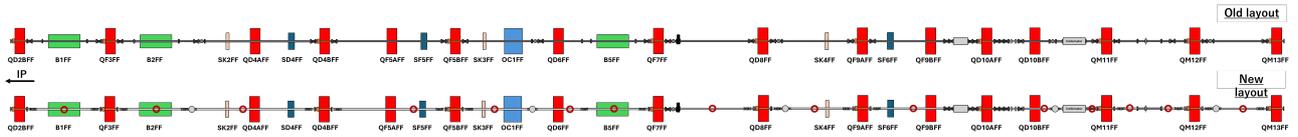


Figure 9: Schematic of the ATF beamline layout before and after vacuum component upgrades.

ている ICF114 フランジにも挿入型の RF シールドを適用し、ビームライン内部形状の連続性を改善した。

5. 真空機器の低インピーダンス化によるウェイク場低減効果の評価

真空機器の改修を踏まえ、本研究では第2章で示した解析的手法と SAD [16] による粒子トラッキングシミュレーションを用いて、ナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響と低減効果の評価を行った。

ビーム強度増加に伴う IP における鉛直ビームサイズの増大はビーム強度依存性変数 ω [nm/1e+9] を用いて定量的に評価可能である。測定された鉛直ビームサイズとその時のビーム強度から Eq. (4) に基づくフィッティングにより算出される。 ω が大きいほどビーム強度依存性は強いことを意味する。この時、IP における鉛直ビームサイズを σ_y [nm]、ビーム強度ゼロの時のビームサイズ σ_{y0} [nm]、ビーム強度 Q [1e+9] としている。

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y0}^2 + \omega^2 Q^2 \quad (4)$$

軌道揺らぎに起因するウェイク場の影響は IP におけるビーム角度の揺らぎとビーム強度依存性変数を用いて定量的に評価できる [9]。ある IP 角度揺らぎ σ_A [μ rad] におけるビーム強度依存性変数 ω [nm/1e+9] から、IP 角度揺らぎに依存する項 ω_1 と依存しない項 ω_0 に分けることができる (Eq. (5))。 ω_1 が IP でのビームの角度変化 (EXT・FF ビームラインでの軌道変化) に起因するビーム強度依存性を示す。

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \omega_1^2 \sigma_A^2 \quad (5)$$

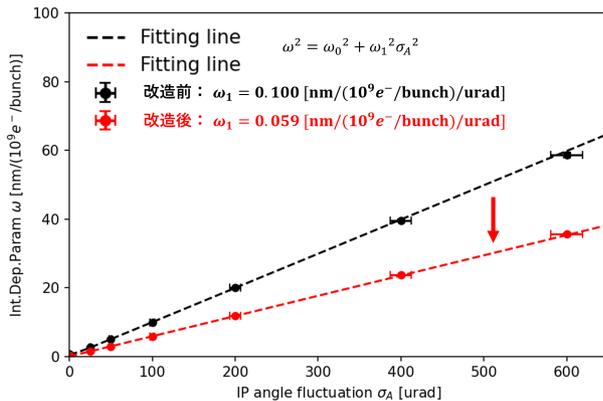


Figure 10: Calculated wakefield effects caused by orbit fluctuations for comparison of before and after beamline upgrade.

Figure 10 に軌道揺らぎに起因するウェイク場の IP でのビームサイズへの影響評価を示す。シミュレ

ーションでは、ビームライン入口の Twiss パラメーターに基づき、正規分布に従うマクロパーティクルモデル (x, x', y, y', z, E) を生成した。さらに IP における角度揺らぎ分布 (RMS: σ_A) に従ってランダムな角度変化 Δy_i^* を仮定した 1000 バunch を IP までトラッキングした。それらを重ね合わせた射影分布から投影ビームサイズを算出した。シミュレーションの結果、改造前 (Table 1 のウェイク源を想定) では影響量が 0.100 [nm/($10^9 e^-$ /bunch)/urad] であったのに対し、改造後は 0.059 [nm/($10^9 e^-$ /bunch)/urad] まで低減されることが示された。このことから、ビームライン改造により極小ビームに対するウェイク場の影響を抑制されることが示唆された。現在、改造後のウェイク場の影響についてビーム試験による評価を進めている。

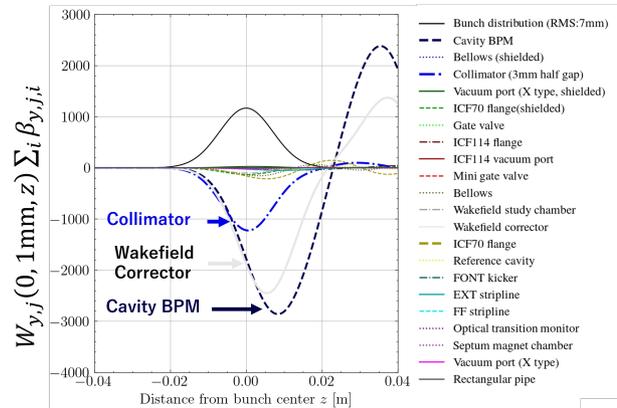


Figure 11: Analytical estimation of the wakefield effects of each type of wakefield sources with orbit fluctuation to the beam size after beamline upgrade. Horizontal axis: the distance from bunch center, vertical axis: the impact of the wakefield kick on the beam size as $W_{y,j}(0, 1, z) \sum_i \beta_{y,i,j}$.

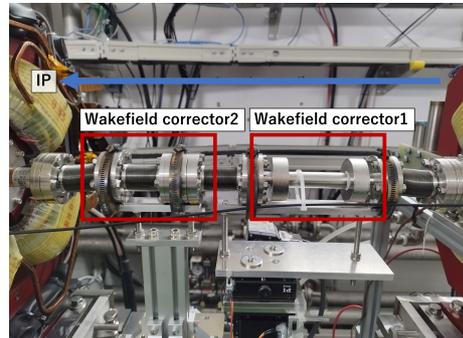


Figure 12: Wakefield correctors installed in the FF beamline. Wakefield corrector 1 consists of the CBPM structure, while wakefield corrector 2 is bellows.

Figure 11 に第 3 章同様、各ウェイク源の極小ビームに対する影響度を評価した結果を示す。Figure 2 と比べて ICF70・ICF114 真空フランジによる極小ビームに対する影響を低減できていることが分かる。CBPM、コリメーター、ウェイク場補正装置が主要なウェイク源として残っていることが示された。

ウェイク場補正装置 (Fig. 12) は可動式のウェイク源を用いてカウンターキックを与えてビームライン全体のウェイク場の影響を補償する仕組みである [17]。現在はベローズと CBPM を模した構造体が組み込まれているが、ベローズは主要因ではなくなったため、撤去を含めた構成の最適化が必要である。また、補正装置とコリメーターはいずれもベータ関数が最大となる区間に設置されており、極小ビームへの影響が大きい。このため、補正装置の構成見直しなど当該区間の装置構成の最適化が今後の課題である。

6. まとめ

ATF ではバンチ強度の増加に伴い IP でのビームサイズが増大する現象が観測されている。その主因はウェイク場であるとされており、特に β 関数の大きな区間に設置された真空フランジや CBPM などが極小ビームに大きな影響を与えることが示されている。本研究では、最終収束ビームラインの真空機器を低インピーダンス化し、ウェイク場の影響低減を図った。具体的には、フランジ接続部や CBPM 前後のビームパイプを段差レス構造に変更し、ベローズや排気ポートも滑らかな内面構造を持つ新規設計品に更新、ICF114 フランジと ICF70 フランジには RF シールドを取付けた。

シミュレーションの結果、改造前のウェイク場影響量は $0.100 [\text{nm}/(10^9 e^-/\text{bunch})/\text{urad}]$ であったのに対し、改造後は $0.059 [\text{nm}/(10^9 e^-/\text{bunch})/\text{urad}]$ まで低減され、極小ビームに対するウェイク場の影響抑制が示唆された。現在、改造後のウェイク場の影響についてビーム試験による評価を進めている。ICF70・ICF114 真空フランジの影響は低減される一方、CBPM、コリメーター、ウェイク場補正装置が主要なウェイク源として残っている。補正装置とコリメーターはいずれも β 関数が最大となる区間に設置されており、今後は当該区間の装置構成の最適化が今後の課題である。

謝辞

本研究は、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

を受けたものです。

参考文献

- [1] F. Hinonde *et al.*, “ATF Accelerator Test Facility - Design and Study Report”, 1995.
- [2] C. Adolphsen, M. Barone, B. Barish *et al.*, “The International Linear Collider: Technical Design Report (TDR)”, 2013.
- [3] T. Okugi *et al.*, “Development of the nanometer beam technology at the accelerator test facility”, in *Proc. PASJ21*, TFSP18, 2024.
- [4] K. Kubo *et al.*, “Extremely low verticalemittance beam in the accelerator test facility at KEK”, *Phys. Rev. Lett.* 88, 194801, 2002.
- [5] Y. Honda *et al.*, “Achievement of ultralow emittance beam in the accelerator test facility damping ring”, *Phys. Rev. Lett.* 92, 054802, 2004.
- [6] G. R. White *et al.*, “Experimental Validation of a Novel Compact Focusing Scheme for Future Energy-Frontier Linear Lepton Colliders”, *Phys. Rev. Lett.* 112, 034802, 2014.
- [7] T. Okugi *et al.*, “Achievement of Small Beam Size at ATF2 Beamline”, in *Proc. LINAC' 16*, Michigan, USA, 2016, MO3A02, pp.27-31.
- [8] T. Okugi *et al.*, “Intensity dependence of ATF2 virtual IP beam size”, in *Proc. PASJ16*, FRPI023, 2019.
- [9] Y. Abe, “Evaluation of wakefield effects to nanometer small beam”, PhD thesis, Accel. Sci. Dept. SOKENDAI, 2024.
- [10] T. Shintake, “Proposal of a Nanometer Beam Size Monitor for e+e- Linear Colliders”, *NIMA* 311(3), 1992, pp.453-464.
- [11] J. Yan *et al.*, “Measurement of nanometer electron beam sizes with laser interference using Shintake Monitor”, *NIM A* 740, 2014, pp.131-137.
- [12] Y. I. Kim *et al.*, “Cavity beam position monitor system for the Accelerator Test Facility 2”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 15, 042801, 2012.
- [13] P. B. Wilson, “Introduction to wakefields and wake potentials”, *Proceedings of AIP conference*, vol.184, pp.525-564 (1989).
- [14] K. Kubo, “ILC new luminosity design and small beam experiments at ATF”, *ALCW2018* (2018).
- [15] Y. Abe *et al.*, “Evaluation of wakefield mitigation effects for upgrading the ATF final focus beamline”, in *Proc. PASJ21*, FRP088, 2024.
- [16] SAD, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [17] J. Snuverink *et al.*, “Measurements and simulations of wakefields at the Accelerator Test Facility 2”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 091002, 2016.