

KEK-ATF におけるアライメントの現状

PRESENT STATUS OF ALIGNMENT FOR KEK-ATF BEAM LINE

荒木栄^{#,A)}, 照沼信浩^{A)}, 奥木敏行^{A)}, 久保浄^{A)}, 黒田茂^{A)}, 阿部 優樹^{B)}, 清水 健一^{B)}, 菊地 隆平^{C)}
Sakae Araki^{#,A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)}, Kiyoshi Kubo^{A)}, Shigeru Kuroda^{A)},
Shimizu Kenichi^{B)}, Ryuhei Kikuchi^{C)}

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

^{B)} SK-service INC.

^{C)} Kantou Information Service (KIS)

Abstract

Accelerator Test Facility (ATF) in KEK is starting the beam-study of ATF2 that is the final-focus beam line in 2009. We confirmed the vertical beam size smaller than 41 nm with low intensity by June 2014 in ATF2. After the several measurements, it was found that the length of the Damping Ring was different with the SAD design. The alignment of DR and ATF2 is good for the most part. We also undergo influence of a seasonal variation, so the measurement environment should be arranged and measured. A precise alignment is established. There is also a magnet by which an alignment error becomes big by a measurement result. We must keep an alignment tolerance fixedly. It reports the alignment status.

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、Figure 1) では、1.3 GeV に加速した電子ビームをダンピングリングにて高品質な低エミッタンスビームにする[1, 2]。これを用いて、国際リニアコライダー (ILC) において必要とされるナノメートルビームの技術開発を最終収束システム試験ビームライン (ATF2) により進めている。ILC での衝突ビームサイズ 7 nm (垂直方向) に対応する極小ビーム (目標垂直ビームサイズ 37 nm) の実現ならびにナノメートルレベルでのビーム位置制御の技術開発が目標である。現在は垂直方向 41 nm を達成しており、高速位置補正技術 (Feedback On a Nanosecond Time scale: FONT) などでビーム位置安定化を進めている。[3, 4]。

加速器のビームラインはビーム光学系に基づき、加速空洞や電磁石などが配置されている。粒子の振動を抑えつつ、電子ビームを目標サイズに絞るためには、電磁石など装置を所定の位置に整列させる必要がある。その設置精度の許容値は標準偏差(1σ)およそ 0.1mm 以下で規定されている。さらに精密な軌道調整が要求されている ATF2 では、主要の電磁石にはベース架台に遠隔操作でマイクロン単位の位置調整機構 (精密ムーバ) が組み込まれている。開発したムーバ架台の多くは Programmable Logic Controller (PLC) でパルスモータを駆動して位置制御をしている[5, 6]。精密ムーバによりビーム運転中のビーム応答を基にしたアライメント (Beam Based Alignment : BBA) が可能になっている。四極電磁石 23 台、六極電磁石 4 台、八極電磁石 2 台に続き、2021 年スキュー六極電磁石 4 台も BBA が可能になった[7]。スキュー六極電磁石は、二次の dispersion などの非線

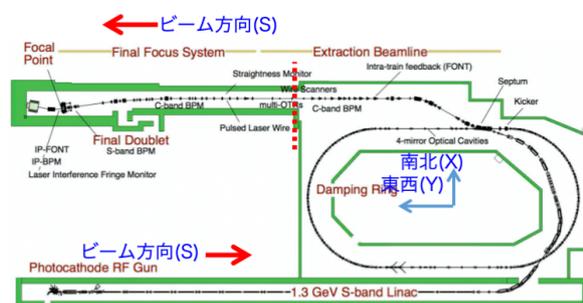


Figure 1: Layout of the ATF beam line.

形ビーム光学系の補正を行い、極小ビームに絞り込むために重要な役目を果たす。電子銃からビームライン全体測量を行ったのでアライメントの現状を報告する。

2. 1.3 GeV リニアック (LINAC) の測量

LINAC 長さ約 80 m を 10 年ぶりに加速管の位置も含めて下流までレーザートラッカー (LT) を用いて測量した。データ解析は、Spatial Analyzer® (SA) の Unified Spatial Metrology Network (USMN)[8]を用いて

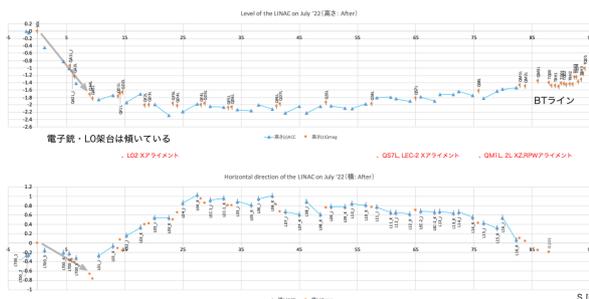


Figure 2: Survey of the 1.3 GeV Linac in July 2021.

[#] sakae.araki@kek.jp

いる。平面座標においては測量網に従い実績も高い。高さ方向は、LT 測量データの場合、80 m 先では、0.5 mm くらい上向きのデータが得られる。詳しい解析はここでは触れないが、地球曲率と同程度の値である。そのため、デジタルレベルで代表点を測量して重み補正を行っている。その結果を Figure 2 に示す。

原点は電子銃のソレノイド電磁石で、高さ (V) は電子銃がある L0 架台は以前と変わらない傾き -2 mm/8 m の結果が得られた。横方向 (H) も L0 架台直後に折れて、下流へ向かって 1 mm 程度湾曲している。LINAC 全体は滑らかに繋がっており大きな経年変動も無いいため、アライメント調整は時間的制約により見送ることにした。

3. ATF ダンピングリング (DR)

ATF のアライメント座標系は、DR 中央を原点とする平面 XY、高さを Z とする (Fig. 1)。閉じた測量網を組めるので LT のみ使用して測量した。

Table 1: Damping Ring Size

周長	138 m
長径	53.4 m
短径	27.6 m
直線	25.8 m

DR の大きさは Table 1 の通りである。直線部の電磁石は個々の架台で据付けてあるが、曲線部は偏向電磁石を含む 36 ユニットのムーバ架台で構成されている。位置調整は遠隔操作も可能ではあるが、ビーム運転中に調整する必要は無い。

3.1 DR 周長測定

2011 年の大震災後のアライメント時以来、年 1-2 回程の DR 測量時に、周長もしくは簡易的な周長を割り出す多角形測量を行っている。Figure 3 に周長の変化分 (周長実測値 - 設計値)、横軸に Week Number で過去 10 年分をプロットした。運転時、ビームライン・トンネル内は空調設備 26 °C 設定で室温 28 °C である。しかし、地盤や地下水などの季節的変動により周長 138 m に対して、最大で -8 mm ~ +1.5 mm ほど変化している。近年は省エネ化のため、メンテナンス期間は極力電力を使わないように努めている。そのため以前より温まりにくく 3 mm くらい運転時より縮んでいる傾向がある。2021 年の測定値を青角、2022 年の値を赤丸で示す。ビーム運転直後の測量では運転時の DR 周長を比較的反映しており、通常は -2 mm ~ 1mm ほどの周長誤差で DR をビーム運転している。

ビーム運転中の周長変動によるエネルギードリフトは Eq. (1) で表され、 dE/E が 0.1% を超えないように、RF 周波数を調整している。

$$\frac{dE}{E} = \frac{1}{\alpha} \frac{dC}{C} \quad (1)$$

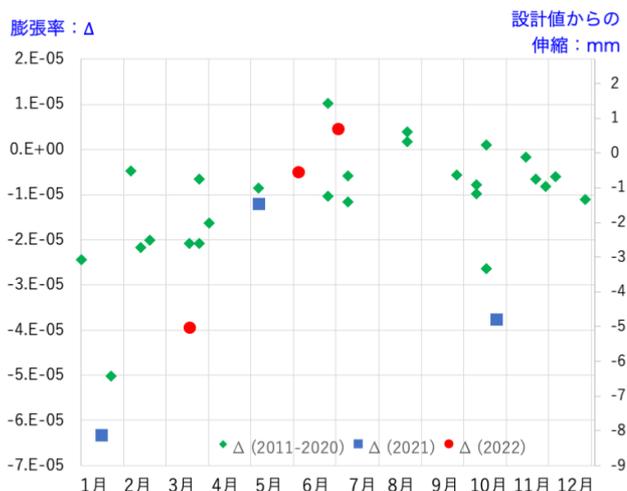


Figure 3: Variation in DR circumference measurement over 12 years.

momentum compaction factor: α に設計値 0.0022 を用いると、周長変化分 $dC = 0.3 \text{ mm}$ である。その値を逸脱しないように、周長変動が収まっているとビーム運転時に影響が小さいことを意味する[9]。

周長の変動記録を膨張率で表すと $-65 \mu\text{m}/\text{m} \sim +10 \mu\text{m}/\text{m}$ 程度である。また、鉄・コンクリートの熱膨張率: $12\text{E}-06/\text{K}$ とすると、温度変化 $-6 \text{ }^\circ\text{C} \sim +1 \text{ }^\circ\text{C}$ と仮定できるため、近年はビーム運転数日前から空調 $26 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 32 \text{ }^\circ\text{C}$ 、電磁石冷却水 $26 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 34 \text{ }^\circ\text{C}$ に設定温度を変えて、予め建屋・床を温めることにより、運転時開始直後の周長の伸びを抑えて概ね良好な結果を得ている。

3.2 DR アライメント

2021 年夏より中期アライメントを進めていた。しかし、2022 年 3 月の地震 (つくば市震度 4、大きな横揺れが数秒続く揺れ) で部分的に動いたことが判明した。予め構造的に弱く動きやすい架台ユニットにダイヤルゲージが設置されており、最大で 1 mm のズレを観測したため DR 測量を行った。その時の周長は設計値より約 5 mm 縮んでいた。曲線部はそのままデザインに合わせて調整すると、その後 DR が伸びていく時に形状が崩れてしまうため、横方向のアライメント残差を小さく収めることが難しかった。そのため収縮している冬季に大規模なアライメント調整は控えていた。近年は、統計的な変形が定量的になりつつある。測量値から収縮率を割り出し、DR 位置デザインと測量値の残差が最適かつ最小になるように DR 伸縮率を割り出して、動径方向のアライメント量を算出した。

Figure 4 に残差を分かりやすくするため 1000 倍に誇張した平面図で示す。3 月の測量結果 (青点) から周長は設計値 -5.2 mm、かなり縮んでいる。単純な周長収縮率は、 $-39\text{E}-6$ となるが、アライメント最適化計算での伸縮率は、 $-33\text{E}-6$ となり赤点ラインで目標値を示す。赤丸で囲われたところが地震で動いたと思われる箇所であり、この機会に全周に渡りアライメント調整を進めた。なお、青丸部分は意図的に

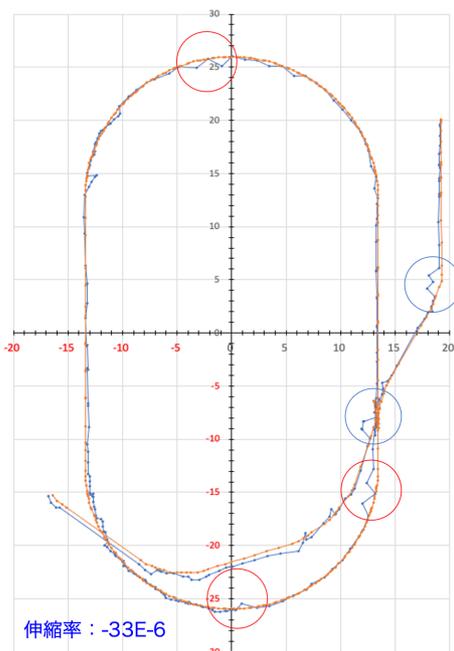


Figure 4: Top view of the survey results x1000 before the DR alignment in March 2022.

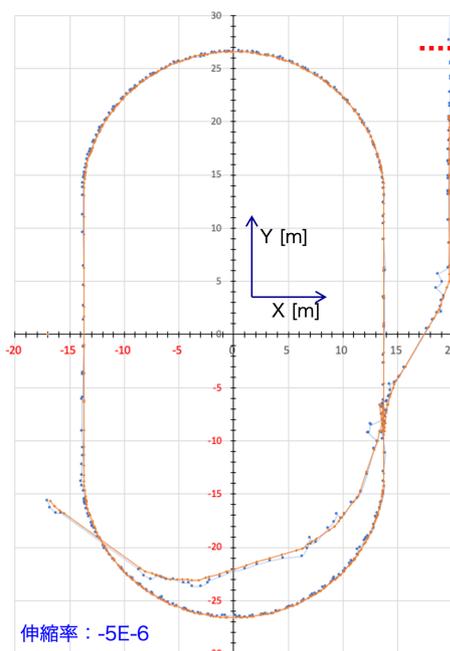


Figure 5: Top view of the survey results x1000 after the DR alignment in June 2022.

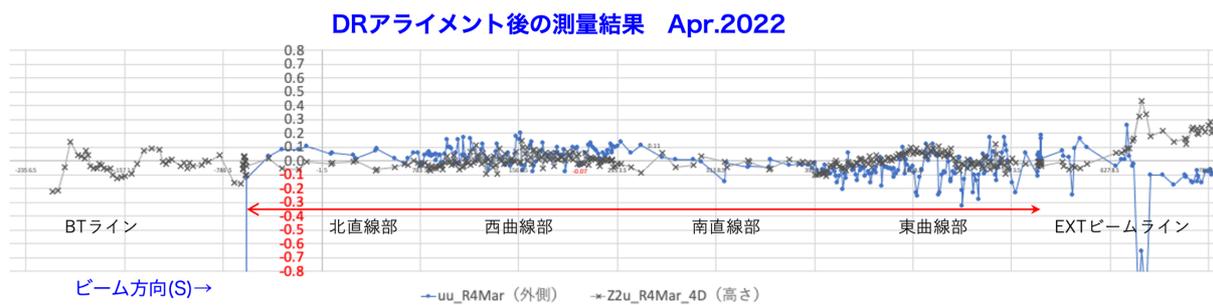


Figure 6: Deviation of the Damping Ring Magnets in April 2021.

ロール回転させて設置してある電磁石の基準点ズレであり、放置とする。その後、春のビーム運転期間の間のメンテナンス時に確認測量を行った。その結果を Figure 5 に示す。6月の周長は設計値 -0.66 mm 、伸縮率は $-5E-6$ 、デザインに近い形状であった。運転直後のため、十分温まっているので、理想の形を保っている。アライメント残差は動径方向 (H) RMS: $71 \mu\text{m}$ で良好な結果である。また、現時点では 1.3 GeV Linac からビームトランスポート (BT) ラインは、アライメントの最適化は定まっていない。

4. 高さ方向の残差

4.1 DR Vertical アライメント

Figure 6 にはアライメント直後の4月の測量結果を示す。横軸はビーム方向 (S)、動径方向 (H: 青点)、高さ方向 (V: 黒)は縦方向の残差が最小になるDR周回平面を基準とした。その高さ方向の残差は RMS:

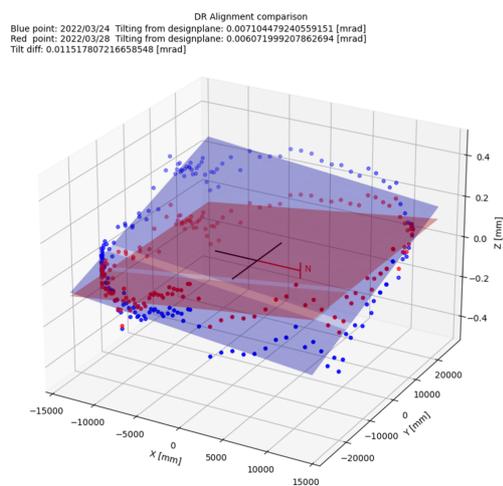


Figure 7: The tilt of the DR level plane.

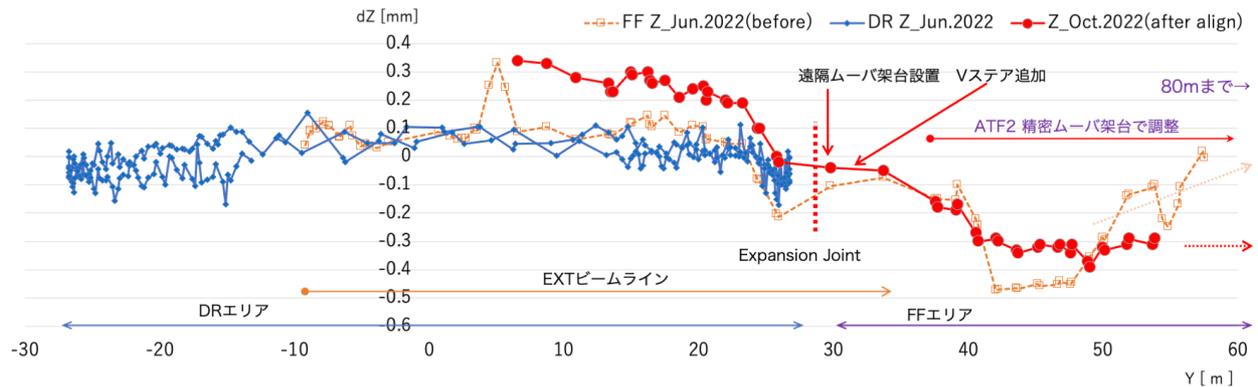


Figure 8: Survey of the DR-ATF2 beam line in April 2022. Red line is Alignment result of the ATF2 in Oct. 2022.

46 μm である。EXT ビームラインは DR 平面と比べると、上向きに 14 μrad 傾いているようにも見える。

DR 平面の鉛直軸からの傾きは 6 μrad (Figure 7 の赤) ほどで、別の測量時では 7 μrad (Figure 7 の青) であった。それらを比較すると 12 μrad 傾きが異なり、測定誤差を超えて高さ方向・平面軸も変動しているように見える。詳しい解析には、水準面や水準測量(高さ)の確認が必要である。

4.2 ATF2 ビームラインのアライメント

ATF2 は DR エリアの取り出しライン (EXT) と最終収束システム試験ライン (FF) に分かれている。後者は 2008 年に増設された部分であり、床構造体も大きく異なる。Expansion Joint を挟んで季節的・経年変動も違うためビームラインに段差が生じがちである。Figure 8 に 6 月測量時の DR (青) と EXT ビームラインの鉛直高さ方向の残差 (橙)、横軸は Y 方向で示す。EXT ビームライン後半のエリア境界付近で下り傾向に FF エリアへ繋がっている。このような屈曲や段差があると電子ビームを電磁石中心に通すのが困難になる。ビーム調整を容易にする対策を 2022 年 9 月に進めた。境界直後の四極電磁石架台を遠隔ムーバ架台に入れ替え、更に Vertical ステアリング電磁石を 1 台追加設置した (Figure 8 赤丸)。6 月と比較すると DR の浮き上がり、もしくは FF の沈み込みが認められた。この様な想定にも今後はビーム軌道の調整が容易になる。

5. まとめと今後の予定

ナノメートルビームの技術開発を進める上で電磁石の精密設置は重要であり、2021 夏から全体アライメントを進めた。ダンピングリングは周長変動に合わせて伸縮率を加味してアライメント調整している。DR アライメント結果は、動径 (横) 方向 RMS : 71 μm 、高さ (垂直) 方向 RMS : 46 μm でアライメントトレランスを満たしている。

ATF2 ビームラインは、ビーム運転中に遠隔で DR 境界部で生じる段差や屈曲に対応できるように、四極電磁石に遠隔ムーバ架台ならびに Vertical ステアリング電磁石を追加した。また、ATF2-FF 部の偏向電磁石を除く主要電磁石には精密調整架台が組み込

まれ BBA が可能である。粗調整でビームラインは滑らかになるようにアライメント調整を進めた。LINAC 測量では大きな変動は生じておらず、BT ラインを含めて今後、調整して入射効率を改善する予定である。

謝辞

本研究を支援いただきました小関施設長および道園主幹に感謝いたします。また、各種作業や測定には ATF 運転管理の皆様にご協力をいただきましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] ATF collaborators, “ATF2 Proposal”, KEK Report 2005-2, 2005.
- [2] K. Kubo *et al.*, “ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE IN FINAL FOCUS TEST AT ATF”, Proceedings of the 10th Annual meeting of PASJ, Nagoya, 2013, SAOTP1.
- [3] P. Bambade *et al.*, “Present status and first results of the final focus beam line at the KEK Accelerator Test Facility”, Phys. Rev. ST-AB 13, 042801, 2010.
- [4] N. Terunuma *et al.*, “Nanobeam R&D at the KEK Accelerator Test Facility (ATF)”, presented at the 19th Annual Meeting of PASJ, Kita Kyushu Online, 2022, TWP014.
- [5] S. Araki, “電磁石精密位置調整ムーバ架台の電動化”, 総合技術研究会 2017 東京大学報告集, 2017, O02-08.
- [6] S. Araki, “ATF 加速器電磁石架台 (精密ムーバ架台) とモータ制御”, 総合技術研究 2019 九州大学 報告集, 2019.
- [7] Y. Abe, S. Araki *et al.*, “BEAM BASED ALIGNMENT OF SKEW SEXTUPOLE MAGNETS IN KEK-ATF WITH MOTORIZED MOVER”, Proceedings of the 18th Annual meeting of PASJ, Takasaki Online, 2021, THP006.
- [8] <http://www.kinematics.com/spatialanalyzer/usmn.php>
- [9] S. Araki *et al.*, “ALIGNMENT OF THE ATF DAMPING RING AND THE REDUCTION OF THE CIRCUMFERENCE CHANGE”, Proceedings of the 14th Annual meeting of PASJ, Sapporo, 2017, TUP139.