

先端加速器試験施設ATFアライメントの保守と運用

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

加速器研究施設 応用超伝導加速器イノベーションセンター (iCASA)

前任技師 荒木 栄

コンテンツ

- KEKについて (ご紹介)
- ATFと国際リニアコライダー計画について (簡単に)
- アライメントとは
- ATF精密アライメント作業報告
- まとめ等

第42回 天文学に関する技術シンポジウム 2023.1.17-18



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

KEKについて

世界でケーイーケーと呼ばれています
Kou Enerugi Kasokuki Kenkyu Kikou

『加速器』を用いて、基礎科学の研究を行っています



宇宙・物質・生命の謎を解き明かす
日本最大級の加速器科学の研究機関



1971年(S46年)
KEK設立51年目



2006年(H18年)
J-PARC設置16年目

出典：KEK技術職員シンポジウムより

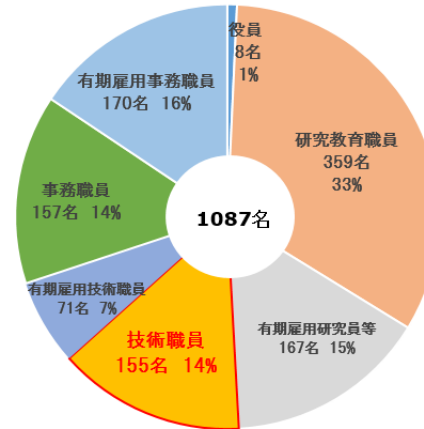
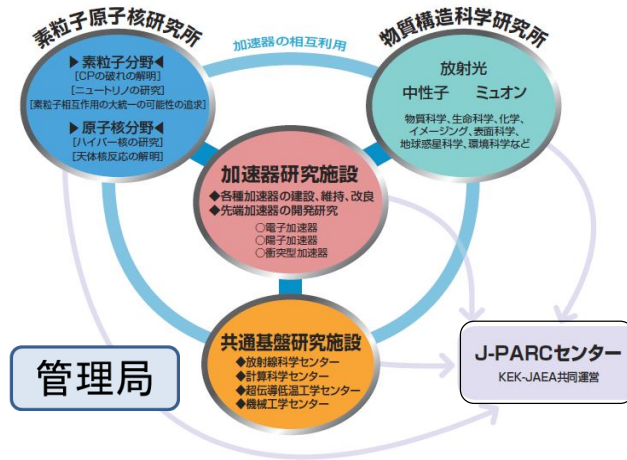
本機構で展開するプロジェクト

キーワードはOPEN(国際協力、共同利用施設)、開かれた実験室

	つくばキャンパス	東海キャンパス	海外
国際協力	SuperKEKB加速器 (ルミノシティ向上40倍へ向けて) Belle II 実験 (CP非保存等の測定による新物理の解明)	長基線ニュートリノ実験施設 (T2K/HK) ステライルニュートリノ探索実験 μ粒子稀崩壊モード探索実験	HL-LHC / ATLAS (スイスCERN) CMB (POLARBEAR、チリ・アタカマ高原) UCN-nEDM (カナダTRIUMF) LiteBIRD (衛星として打上げ)
共同利用施設	フォトンファクトリー (30ビームライン、47ステーション) (物質と生命の探究の場) 電子加速器群の入射器開発 低速陽電子実験施設	J-PARC加速器 (ビーム増強) ハドロン実験施設 (次世代のダブルストレンジ核分光の展開、 ^3H 寿命測定、SM予想値の感度化、ハドロン質量獲得機構の解明) MUSE計画 (4つのビームライン) 中性子ビームライン	KISS- II (和光理研内)
将来計画	ILC計画の技術開発 産業応用のためのcERL iCASA (Mo-99製造、電子線照射によるナノセルロースの高効率・低コスト製造) フォトンファクトリー (医学イメージングビームライン)	iBNCT (がん治療用加速器) ミュオンg-2/EDM (超精密測定による新しい物理法則の探索)	QUP (量子揺らぎ起源の重力波観測、量子場計測技術の開発)

プロジェクト＝研究所・研究施設とは限らない／掛け持ちも多い

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構



(令和3年4月)

	技術職員/研究教育職員
素粒子原子核研究所	27名/119名
物質構造科学研究所	21名/ 50名
加速器研究施設	64名/142名
共通基盤研究施設	35名/ 40名
管理局	157名

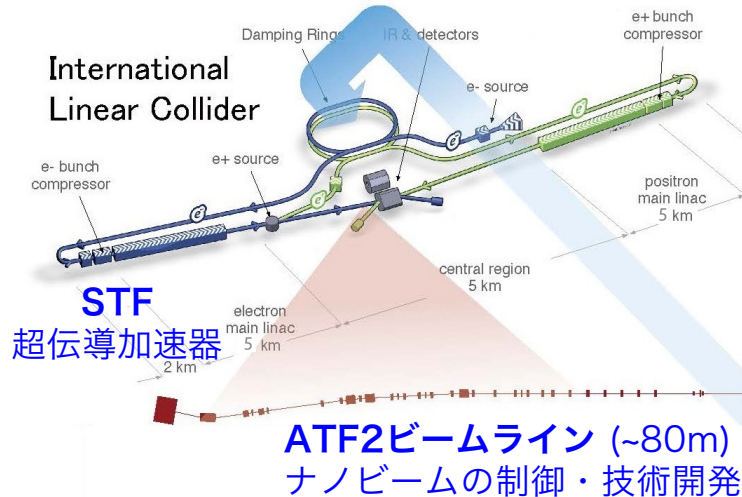
研究教育職員	359名 (33%)
有期雇用研究員等	167名 (15%)
技術職員	155名 (14%)
有期雇用技術職員	71名 (7%)
事務職員	157名 (14%)
有期雇用事務職員	170名 (16%)

研究系技術職員は、それぞれの研究所・研究施設に直接所属。いわゆるスタッフ制法人化後、技術部組織（ライン制職階）を解体、技術部門連絡会議をもって連絡・調整部長・課長 ⇒ 任期付き併任職のリーダー（技術調整役・技術副主幹）

出典：KEK技術職員シンポジウムより

ATFと国際リニアコライダー計画

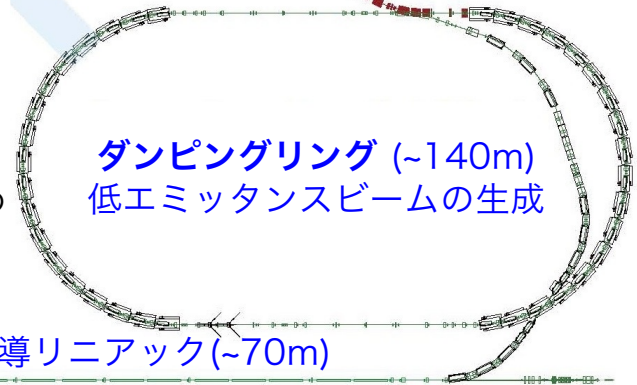
ILC : International Linear Collider 国際リニアコライダー計画とは？



電子・陽電子 直線型 衝突加速器
(全長およそ20km) 将来計画
地下トンネル
大規模研究施設
重心系エネルギー：250GeV

先端加速器試験棟 (ATF) とは？

国際リニアコライダー (ILC) を実現するために必要な先端加速器 技術開発 を行う

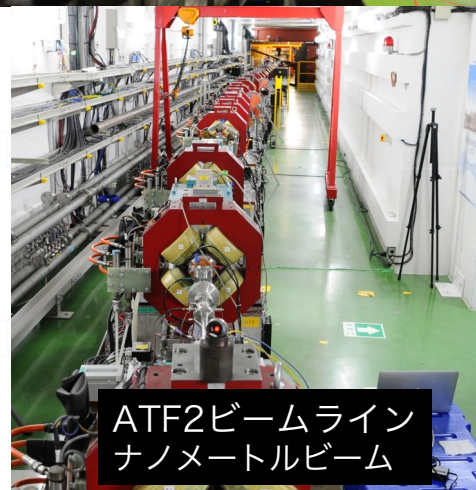
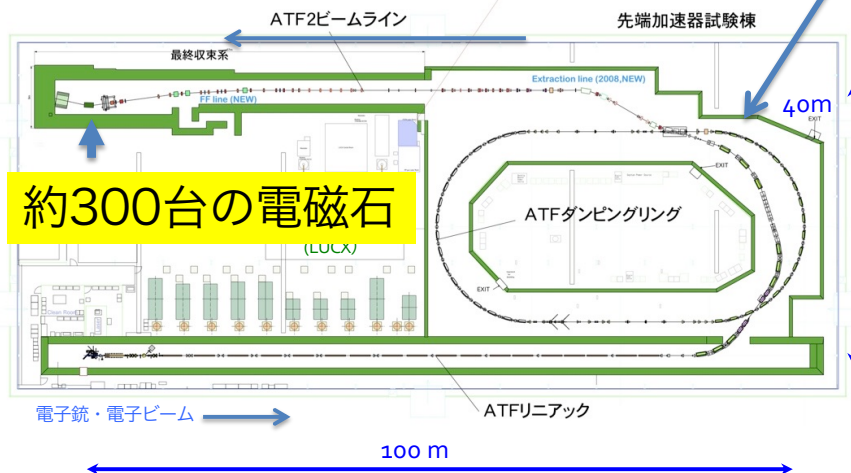


線形電子加速器：1.3GeV 常伝導リニアック(~70m)

ビームトランスポートライン
(BT)

先端加速器試験装置 (ATF)

- 国際協力で進めている
- 低エミッタンス電子ビームを用いて
実現するナノメートルビームの技術開発
- 数十ミクロン精度の精密アライメントが求め
られている：担当：荒木
- 運転管理（業務委託）と協力
- 冷却水関係・電気配線・安全管理

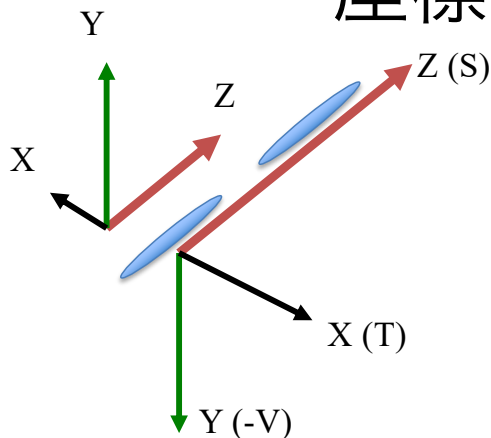


アライメント

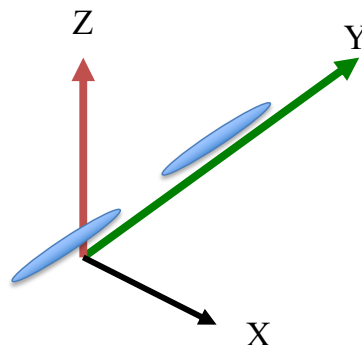
加速器のアライメント

- ビームラインを構成する装置：電磁石 など
- 設計値に正しく配置：0.1mm以下
- ビーム方向に対して： たて、よこ
- ビーム運転時 ビーム位置が分かる
(注意： 温度変化など、機械中心と電磁場中心との誤差)
- → ビームベースドアライメント
- さらに精密調整にはリモート制御が必要
(電磁石の位置に合わせて、軌道を曲げて調整する：補助コイル。
または、ビーム軌道に電磁石を合わせ込む：リモート精密調整架台)
- 経年変化（季節変動・沈下）などで設置位置がずれることがある
- 維持管理が必要

座標系（右手系）



- ビーム光学系
- 進行方向をZとする
- 加速器はよくこれを用いる



- アライメント座標系
- 今回の座標系
- 上をZとする
- 使い勝手からこれを用いる

定義など決め事を確認する。共通の認識にしておくこと！

– データを見直したときのプラスマイナスの向きが正しいのか？ –
曖昧な記憶より証拠のある記録

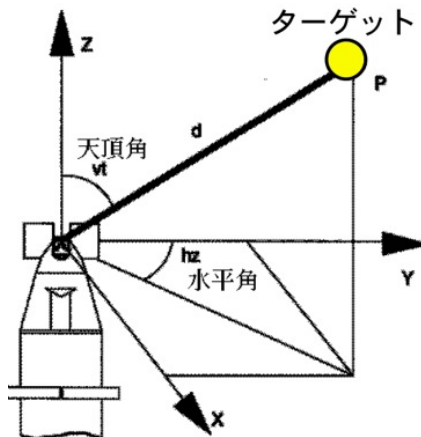
可搬型3次元測量機

近年の定石：
三次元データ取得

- 測距精度が良い自動視準のトータルステーション
- ADM測距精度: 40 μm / 30m
- トラッキング可能、目視は不可
- 測定精度：70 ~ 100 μm / 10m
- 内蔵電子水準器から水平面を定義できる（分解能1秒）
1秒 = $1/(360^\circ \times 60' \times 60'') = 0.8 \mu\text{rad}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)



Faro Vantage



距離と2角度



Leica AT403
ATFS600 / AT960

その他アライメント機材

- **高さ測量**（水準測量） チルティングレベル（Yレベル）
使用精度：30 $\mu\text{m}/10\text{m}$ アナログ（目視準）→デジタル（標尺）
- **ビーム軸回転** [Roll]、電磁石**基準面** + 気泡管 →デジタル傾斜計
使用精度： 0.05 mrad
- **粗調整**用にローテーティングレーザー（RL）、レーザー墨出器
直線、水平面、 使用精度：500 $\mu\text{m}/10\text{m}$
- **適材適所で使い分け** ⇒ 効率化

チルティングレベル

デジタルレベル
(スタッフバー使用)

気泡管

ローテーティングレーザー
(アライメントレーザー)

デジタル



ビーム位置モニタ (BPM) のアライメント

- ビームパイプ・小型装置などのアライメントも重要
レーザーターゲットの届かない場所

3次元多関節測定器 (FAROアーム) 導入 (2009年)

⇒ 局所的な精密測定 : 100 μ m精度

⇒ ビームモニターなど精密アライメント

ビームポジションモニター・プロフィールモニターほか

◆ 座表系を測量データと融合
電磁石基準点・補助基準点を活用
(座標系Fitting)

- 測量ネットワークが重要データベースの作成

トレーサビリティマトリクス

– 設計や品質 (精度) が追跡できるように準備 –
現状と変更点など資料を管理するして可視化する



FAROアーム測量
(測定範囲直径 3 m)

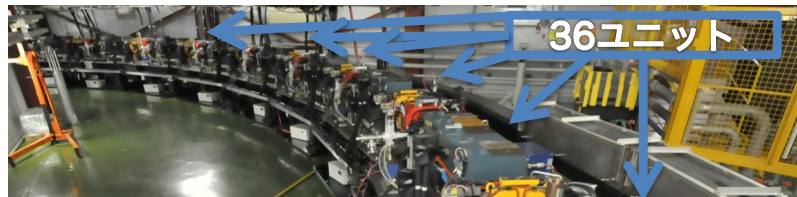
測量ネットワークの構築

- 地理測量（三角点、水準点）を踏まえて（磁石上の）基準点の等級分け
- 見通しがきかない大規模アライメント ⇒ **大中小エリアに分割**

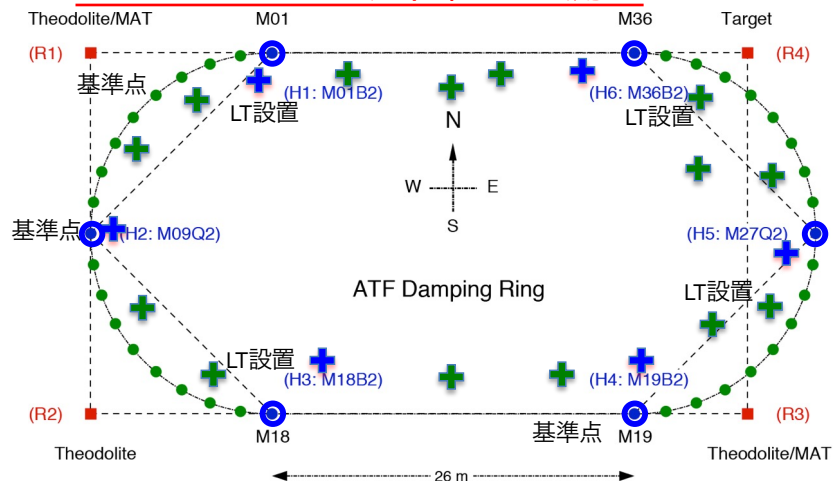
DRに適応：LT設置場所にも格付け

⇒ 6角形、重要・簡易測量

⇒ 36角形、通常・電磁石測量



- LT& Yレベル を定位置から測量



およそ20カ所から測量

周差：水平方向 $\approx 0.5\text{mm}$
高さ方向 $\approx 0.2\text{mm}$

測量手順の最適化

- 1) 基準点・高さ基準の変動確認
- 2) 適切な機材の選定（測量範囲、要求精度）
→ 組み合わせて効率化

必要なアライメント要請に迅速に対応可能

- 3) データベースの整備（20～50点@LT x 20カ所）
→ 測量中に随時比較（加速器設計・前回測量値）
→ 変化の範囲で環境変化の影響なのか明らかになる、

測定ミスと変動の判断が可能

短時間で目標精度の達成が可能

ATF精密アライメント作業

先端加速器試験装置 (KEK-ATF) アライメント

- 2011大規模アライメント：東日本大震災後
その後は微調整、2021夏より中期アライメント **10年ぶり**
- アライメント座標系：上面XY、垂直Z（ビーム方向S、動径外向R、高さH）

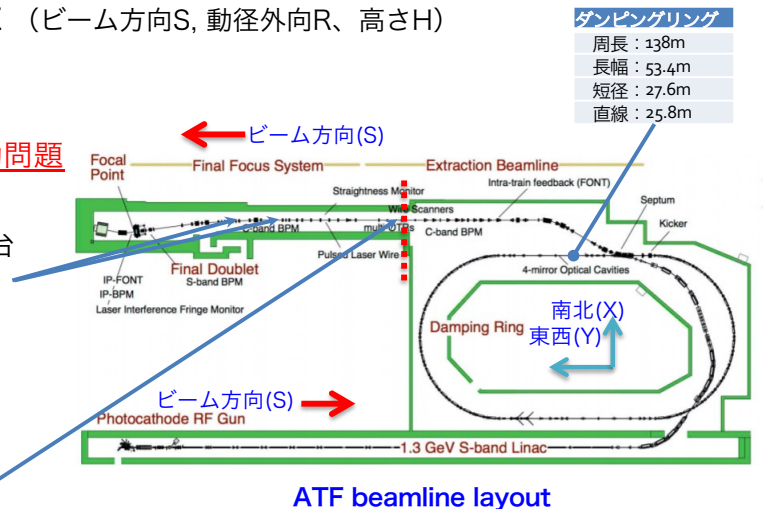
- ダンピングリング(DR)：アライメント
周長：140m 周長（温度・構造）**変動問題**

- FF部 Skew Sextupole magムーバ架台
（2021夏 設置済）

- ATF2ビームライン：アライメント
BL長：FF 40m, EXT 40m
（中間にエクспанションジョイント有）
季節的に動いてしまう問題

- EXT部 Steering mag 追加
- EXT部 Quadrupole magリモート調整ムーバ架台を追加
（**2022夏 1台導入設置**）

- 1.3 GeV リニアック(LINAC) 80m：測量
- ビームトランスポート(BT)：測量（現在進行中）



DR 周長測定・10年分の履歴

- LT測定：リング全体の測量結果より
- 周長(C) 140m：季節変動 -8 mm ~ +1 mm
- 変動問題：建屋が冷え切ると、3 ~ 4 mm縮む
膨張率： -65 μm ~ +10 $\mu\text{m}/\text{m}$

- ビーム運転中の周長変動による
エネルギードリフト

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

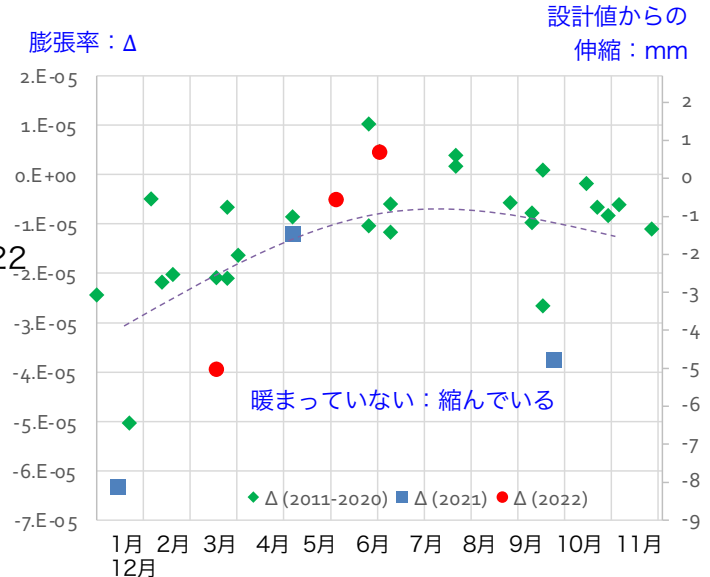
α (momentum compaction factor): 0.0022

$$dE/E = 0.1\%, \quad dC = 0.3 \text{ mm}$$

を超えないように、実験時はRF周波数を調整

- 鉄・コンクリートの熱膨張率：12E-06/K
-6°C ~ +1°Cの温度差と仮定できる
- ビーム運転前に予め建屋・床を温める
- 空調 26→32°C・冷却水 26→34°C

DR周長（準拠）の伸縮



↑まだ判らないことだらけ

データの数と種類が増えれば、変動の予測精度が上がるかもしれない！

DR アライメント

■ 2021夏 DRアライメント

■ しかし、2022年3月の地震（つくば市震度4）で大きくズレた！

■ 2022/03 DR測量 -----> アライメント/ビーム運転 -----> 2022/06 DR測量

部分的に設置してある
ダイヤルゲージに変化

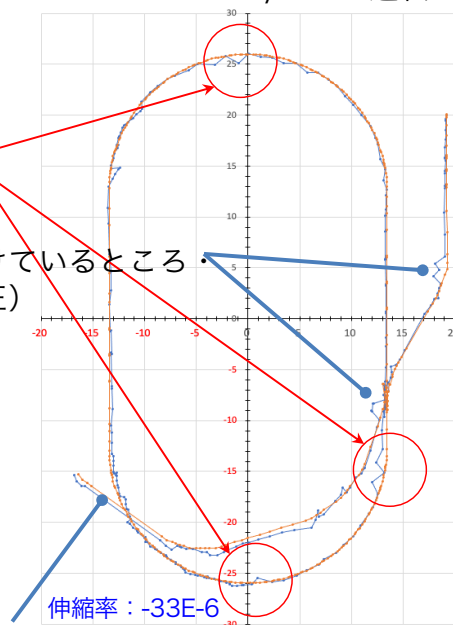
■ 横方向最大1mmほど
地震により動いた

■ 意図的に電磁石を傾けているところ
(基準設計値は未補正)

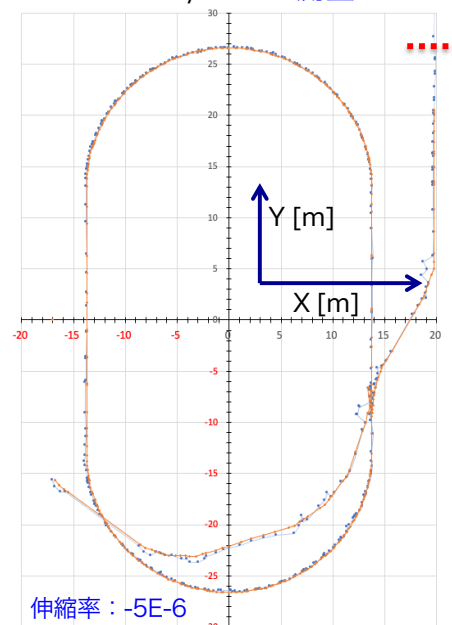
■ 設計値と測定値を比較
ズレを1000倍で表示

アライメント後

■ 2022/06 DR測量
動径（横）方向
RMS : 71 μm



DR 横方向の誇張図 Mar.2022



DR 横方向の誇張図 Jun.2022

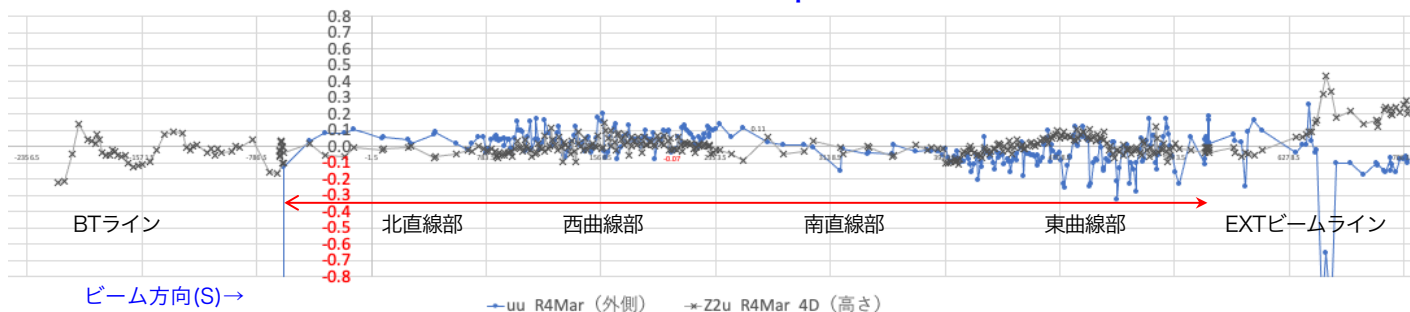
■ BTライン 未アライメント

DR アライメント 高さ方向

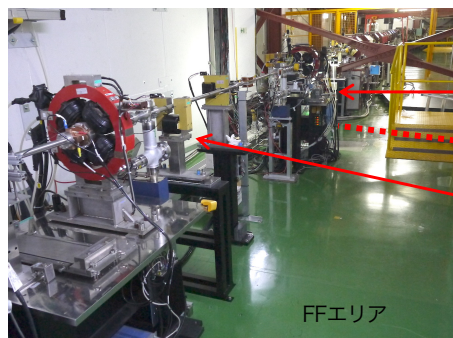
■ LT測定：リング全体の測量結果より

■ DR高さ（垂直）方向 RMS : 46 μm (黒印)

DRアライメント後の測量結果 Apr.2022



■ DR-ATF2の境界で段差が生じる対策



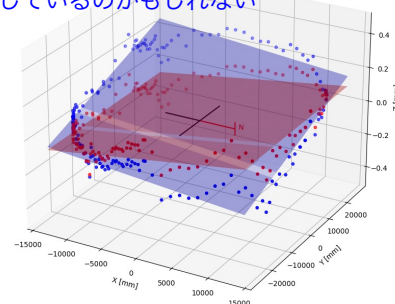
QD20X (遠隔ムーバ架台設置)

Expansion Joint

Vステア追加

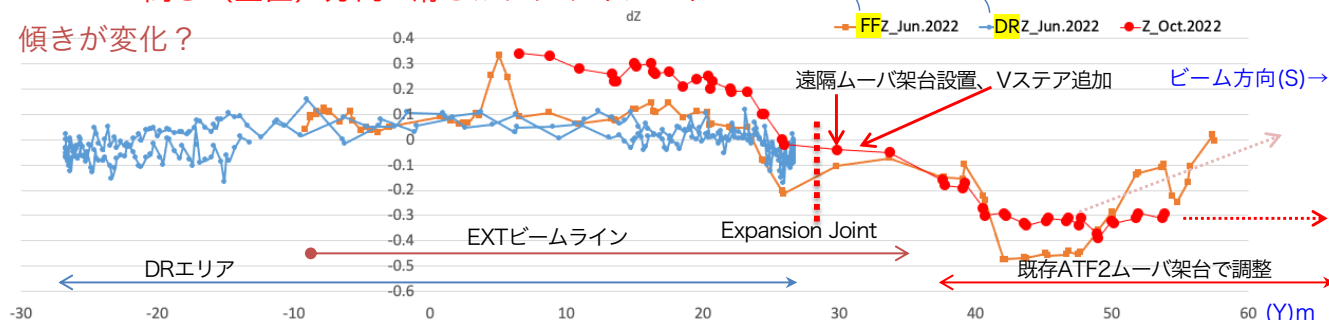
FFエリア

DR Alignment comparison
Blue point: 2022/03/24 Tilt from design plane: 0.007104479246559151 [mrad]
Red point: 2022/03/28 Tilt from design plane: 0.006071999207862694 [mrad]
Tilt diff: 0.011527807216658548 [mrad]
DR鉛直軸は、11 μrad 程度傾いている？
変動しているのかもしれない



ATF2アライメント 高さ方向

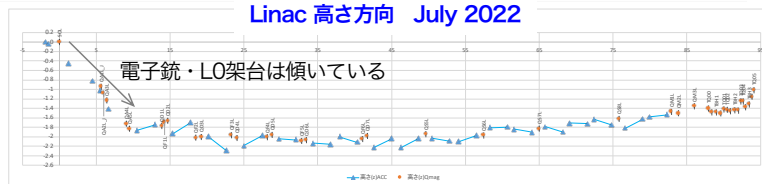
- LT測定：リング全体の測量結果より
- EXT-FF 高さ（垂直）方向 滑らかにアライメント
傾きが変化？



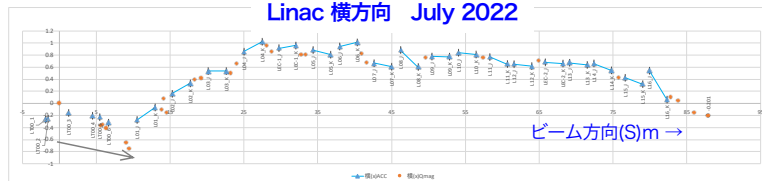
- Linac LT・レベル測量：
残差は10年前と同じ傾向、大きな問題はない



Linac 高さ方向 July 2022



Linac 横方向 July 2022



精密アライメントまとめ

- 2021夏から、およそ10年ぶりの全体アライメントを進めた
- ダンピングリング(DR)の横方向・周長が変動するが、ある程度コントロール可能である
- DRアライメント結果（伸縮率を加味して調整を進める）
 - 動径（横）方向 RMS : 71 μm
 - 高さ（垂直）方向 RMS : 46 μm

- ATF2ビームライン：アライメント 滑らかに繋いだ（解析中）

（DR—ATF2のエクспанションジョイント）季節変動で段差が生じる対策として

- 建屋境界の直近にQuadrupole magに遠隔ムーバ架台、Steering mag (Vertical)を
2022年9月に追加して、ビーム運転中に遠隔で段差や屈曲を吸収できる
- 1.3 GeV リニアック(LINAC)：測量の結果、大きな変動はない
（電子銃架台が傾いたままであるが、今年度は調整せず見送り）
（今後の予定）
- ビームトランスポート(BT)：今後アライメントを進める予定

まとめ

レーザートラッカーなど測定装置のデジタル化は年々進んでいる
伝統的な基礎技術も理解して使いこなすことが重要

- 測る・数値化すれば、調整・アライメントは可能である
- 定義など決め事を確認する、データベースを作成する
- 要求される精度と手間のバランスを考えること
- 異なる機器や手法での確認作業・トレーサビリティも考えて進めること

「手順の最適化」するためには？

データベースの規格化、専門性の向上、多角的に考える
技術者として！どうやって？

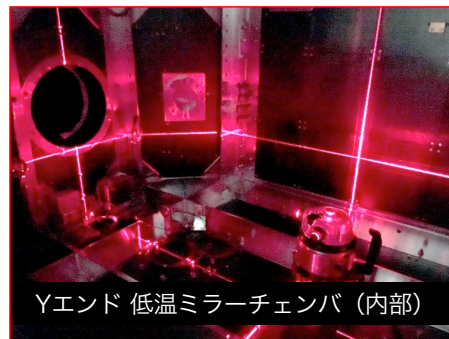
- シンポジウムや研究会や学会などに参加する
- 見聞を広める・人脈を広げる
- 仕事を振り返える・報告してまとめる

達成感を味わい！ モチベーションを上げることが重要

KAGRA協力



真空槽MCEフランジ
(内部計測)



Yエンド 低温ミラーチェンバ (内部)



Yエンド 低温ミラーチェンバ

KAGRA 中央エリア 基準点の設置ならびに測量

基準点の保守



ご視聴ありがとうございました