

SuperKEKB入射器における陽電子用DCソレノイドの 測量とBPM、ステアリングコイル設置

柿原和久（KEK）、荒木栄、岡安雄一、田中窓香、横山和枝、荒木田是夫、
諏訪田剛、肥後壽泰、紙谷琢哉（KEK）

要旨

SuperKEKB 入射器の陽電子生成部周辺ビームライン上の機器構成は陽電子生成用タングステン標的、収束用のフラックスコンセントレータ、そして低エネルギー陽電子輸送用 DC ソレノイド 29 台（全長約 15 m）とその内側に大口径 2 m 加速管 6 本である。2019年にはDCソレノイドの電流値を変化させることによりビーム軌道のずれが発生することが判明していた。また陽電子生成用標的以降15 m以上の区間においてビーム位置及びプロファイルを知るためのモニターや軌道調整用の電磁石が無くビーム運転上の困難があった。これらを改善するために2020年8～9月にDCソレノイドの設置位置測量とBPM、ステアリングコイル各4台の設置を実施した。本会では可搬型三次元測定器（Faro ARM）やレーザートラッカー（Leica AT401）を用いて測定したビームライン上DCソレノイドの設置状態、及びソレノイド内に組み込んだBPM、ステアリングコイルの設置方法・状況について報告する。

SuperKEKB入射器の陽電子捕獲部周辺の機器配置と陽電子ビームの状況

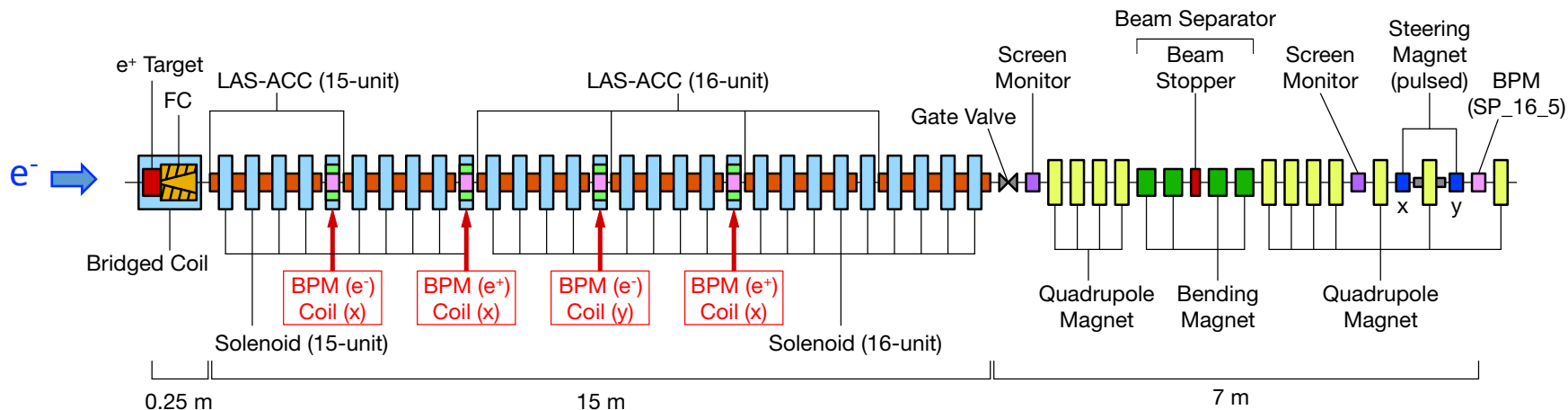


図1 陽電子捕獲部周辺の機器配置

主な機器の配置 (上流より)

- ・陽電子生成ターゲット タングステン製、直径： $\phi 3$ 、長さ：14 mm
- ・フラックスコンセントレータ (FC、パルスソレノイド)
- ・ブリッジコイル
- ・大口径型Sバンド (LAS) 加速管 内口径： $\phi 30$ 、全長：2.2 m
- ・DCソレノイド 全29台
 Type-L 外径： $\phi 590$ 、内径： $\phi 260$ 、全長：427 mm、0.3~0.4T/15-unit
 Type-S 外径： $\phi 590$ 、内径： $\phi 200$ 、全長：427 mm、0.4~0.5T/16-unit
- ・スクリーンモニタ
- ・Qマグネット
- ・ビームセパレータ 偏向電磁石で電子と陽電子を分離し陽電子のみを通す
- ・ステアリング 磁場 (BL値)：0.0032 Tm@5A 2020年夏用電子捕獲部に4台設置
- ・BPM (ビーム位置モニタ) 2020年夏用電子捕獲部に4組設置 * WEP023 諏訪田氏の発表参照

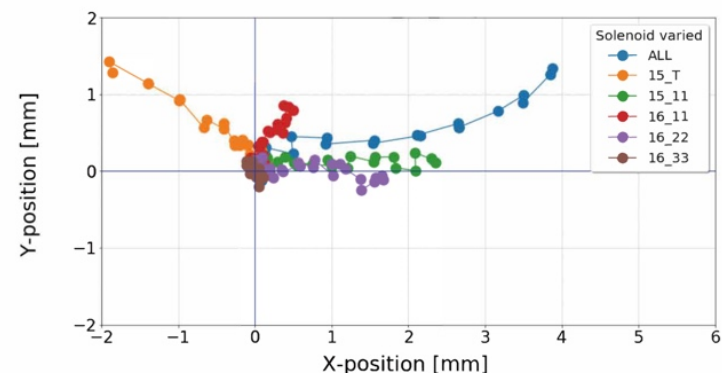


図2 ソレノイド磁場変化時の陽電子ビーム位置

問題点と対応

- ・ SuperKEKBコミッションing-3 直前の2020年2月、DCソレノイド磁場の变化に伴う陽電子ビームの変位が確認された。
- ・ DCソレノイドのミスアライメントと構造上の磁場の不均一性が原因と考えられ、前者の調査を行った。

DCソレノイドの測量

各DCソレノイドの設置状態を求めるための測定

- ・ソレノイドの上流側と下流側の円筒測定（各20点以上）と、共通する測定点と補助点を含む全ソレノイドの設置範囲をレーザートラッカーによる測量結果から基準となるビーム軸に対する設置状態を求めた。
- ・使用機器：

可搬型三次元測定器	Faro ARM (Fusion 10 fit)
三次元測量機	Laser Tracker (Leica AT401)
解析ソフトウェア	Unified Spatial Metrology Network (USMN) <Spatial Analyzer (SA)>
- ・基準ビーム軸は16ユニット上下流に取り付けられている測量基準点を結ぶ直線をx方向に-400 mm、z方向に+420 mm 平行移動した直線。
- ・測定用補助点をソレノイドとユニット架台に各4点以上設けた ⇒ ソレノイドと架台の位置関係を把握
- ・Faro ARMの測定範囲はソレノイド3~4台分。全9箇所測定。
- ・特にFaro ARMは機器操作時に力が加わるため設置状態が測定精度に大きく影響する。その対策として途中から三脚上部をユニット架台と連結したり脚と床の接触部付近をホットボンドで仮接着した。
- ・測定は30 ton を超える放射線遮蔽シールドの有り、無し、DCソレノイドの取り出し前、復元後に実施。

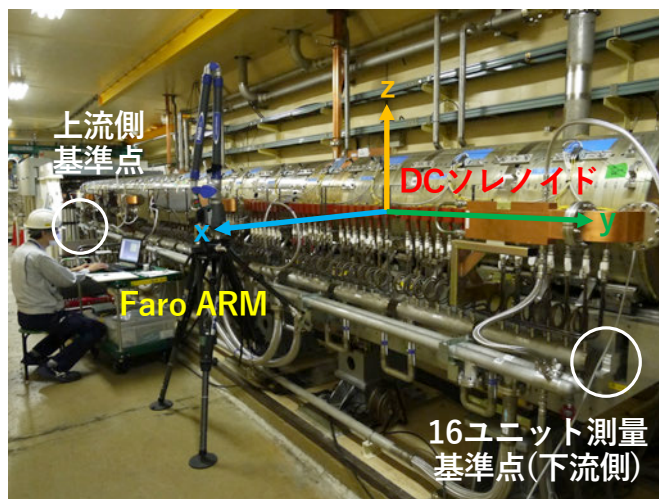


図3 Faro ARM測定

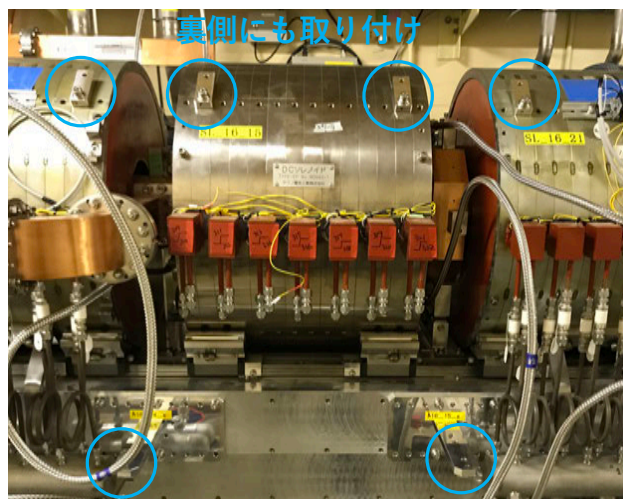


図4 ソレノイドとユニット架台の補助点



図5 レーザートラッカー測量

DCソレノイドの測量結果

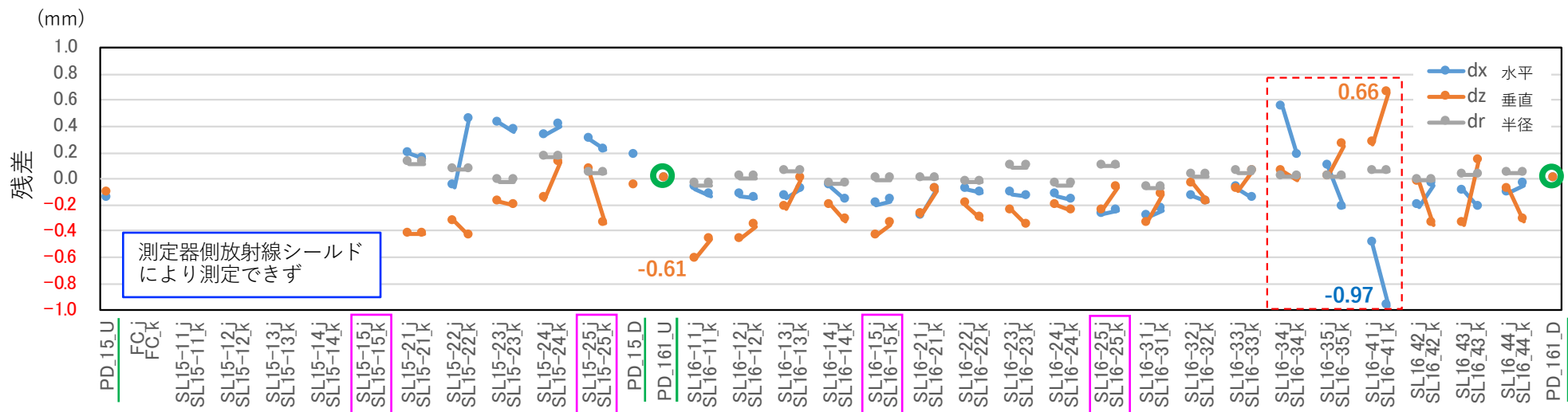


図6 DCソレノイド円筒中心位置（加速ユニット測量基準から求めた設計値との残差、放射線シールドあり）

- (1) FaroARMによる円筒測定の結果をレーザートラッカー（LT）測量結果にUSMNを用いてフィットさせた結果が図6 [ビーム基準との残差]
- (2) dx(max)は-0.97 mm (SL_16_41) SL_16_34~SL_16_41を除くと±0.5 mmの範囲
- (3) dz(max)は0.66 mm (SL_16_41) 他はSL_16_11を除き±0.5 mmの範囲
- (4) dr(max)は0.17 mm (SL_15_24) 他はSL_15_21を除き±0.1 mmの範囲 [設計値：直径490±0.25 mm]
- (5) 傾きは最大1.18 mrad (SL_16_41)
- (6) SL_16_34 ~ SL_16_41の数値が大きい原因として FaroARMの設置状態が影響している可能性大
 - ⇒ この場所を最初に測定し、その後三脚の固定方法を強化した（架台との連結、床面との仮接着）
 - ⇒ 復元後の差分（図12）が他より大きい⇨復元後はdx、dz共 -0.25 ~ 0.04 mm

結論

ビーム試験により2 mmオフセンターのビームを通して軌道のずれが発生しなかったことから、およそ±0.5 mmに設置されたDCソレノイドは軌道ずれの主な原因でないことが明らかとなった。

DCソレノイドの取り出し、復元

対象 5、10、15、20台目の4台（加速管間）

設置状態 ソレノイドの長さ (A) は全て427 mmに対し加速管間距離は3通り

	5台目(SL_15_15)	10台目(SL_15_25)	15台目(SL_16_15)	20台目(SL_16_25)
加速管間距離 (B) (mm)	437	432	407	407
空間寸法 (B)-(A) (mm)	10	5	-20	-20

方法（取り出し）

- (1) 上流側（5台目）から順に取り出し
- (2) 5台目以外はソレノイドをビーム方向に動かし作業空間を確保
（ソレノイドはLMガイドブロック4個に載っている（図8））
- (3) ビームダクトフランジ締結開放
（締結はチェーンランプ：EVAC社製）
- (4) 加速管フランジとソレノイド間に保護シート挿入
- (5) LMガイドブロックに取り付けてある連結金具とソレノイドを分離
- (6) クレーン等で吊り上げ通路側に取り出し

方法（復元）

- (1) 下流側（20台目）から順に復元
- (2) LTで位置を確認しながらソレノイドを調整し連結金具を接続 [調整箇所]
- (3) BPMの下流側ベローズを最大に伸ばして下流側フランジ締結
- (4) (3)のベローズを最小に縮める位置にソレノイドを移動(上流側空間確保)
- (5) BPMの上流側ベローズを最大に伸ばして上流側フランジ締結
- (6) LTで位置を確認しながらソレノイド位置を復元、その後加速管位置復元

BPM 全長431 mm、上下流に作業に必要な伸縮量 (-12/+8) を持つベローズを取り付けたベローズの仕様上、最も縮んだ状態で接続されている

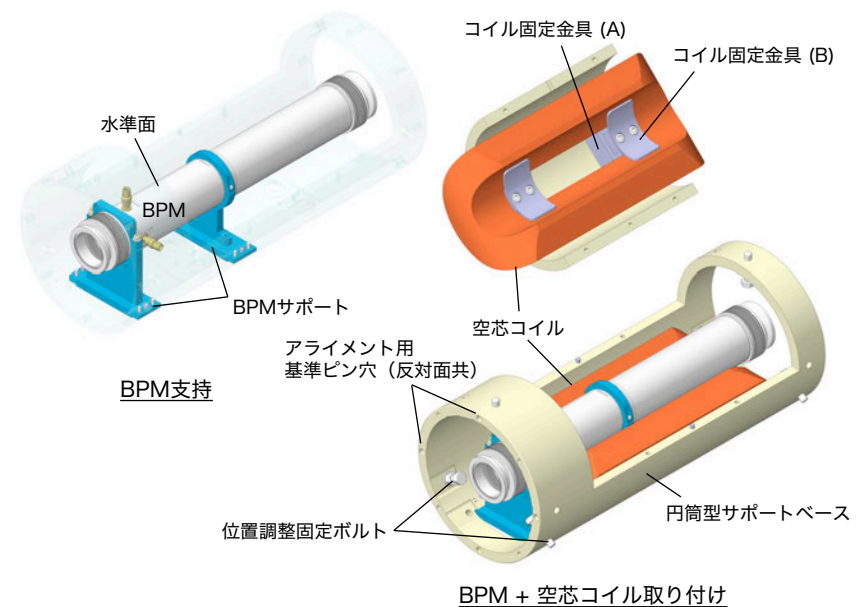


図7 ソレノイド取り出し

DCソレノイド内側へのBPM、空芯ステアリングコイルの取り付け

BPM、空芯コイルの取り付け

- (1) アルミ合金 (A5056) 製の2分割サポートベース内面に各1個の空芯コイルを位置決め金具(A)、(B)により取り付け
- (2) 水平な石定盤上で円筒の両端面に設けた測量用ピン穴 (4個、等分) を基準として、BPMとの中心軸、水平合わせ
- (3) BPM、空芯コイルを取り付けた円筒を一体化
- (4) 測量補助基準金具を取り付けたままのソレノイドを石定盤上に精度良く取り付けられた2本の軸の上にソレノイドを載せてLTによりビームライン設置時の水平状態を再現
- (5) LT2台を使って(4)と(3)の中心軸と水平面が一致するように位置調整用ボルト (上下流、各3本) で位置決め
- (6) 垂直用は90度回転させて取り付け



作業中発生した問題 <どちらも設計に問題があった>

- ・サポートベースを回転させる機構がない ⇒ SUS304シート (0.1 mm厚) を位置調整ボルト先端に挟んで対応
- ・1台目時に位置調整ボルトを12.5Nmで締めるとサポートベースが変形 (~0.2 mm) ⇒ 10 Nm (~0.1 mm) に変更

取り付けアライメント結果

- ・円筒基準ピン穴の水平とBPM基準面の傾きは0.1 mrad
- ・最終的にソレノイド中心軸とBPM中心軸の設置精度は ± 0.15 mm

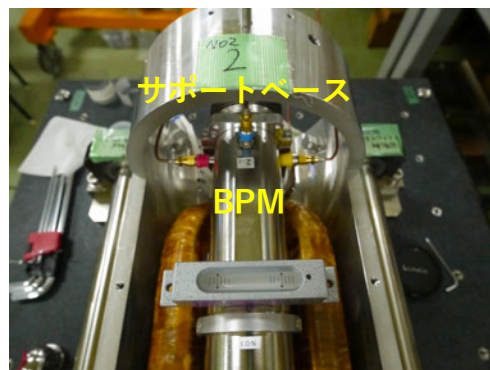


図8 BPMロール調整

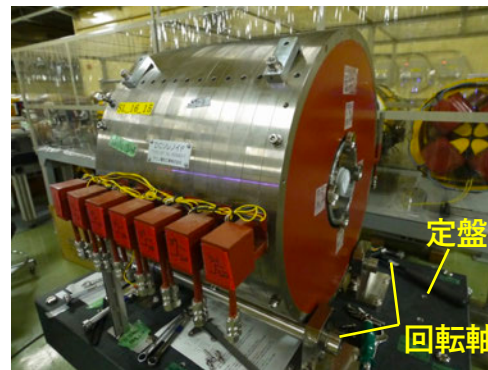


図9 定盤上のソレノイドとBPM他

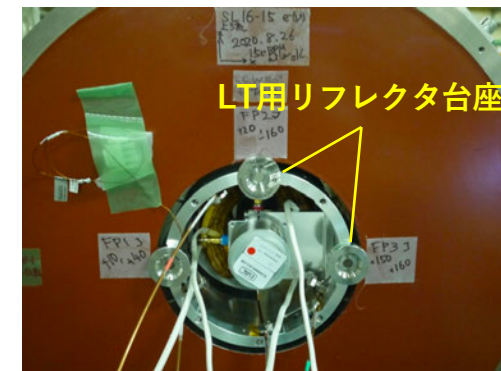


図10 最終調整時 (サポートベース基準点測定)

DCソレノイドの復元後の測量結果と取り出し前との比較

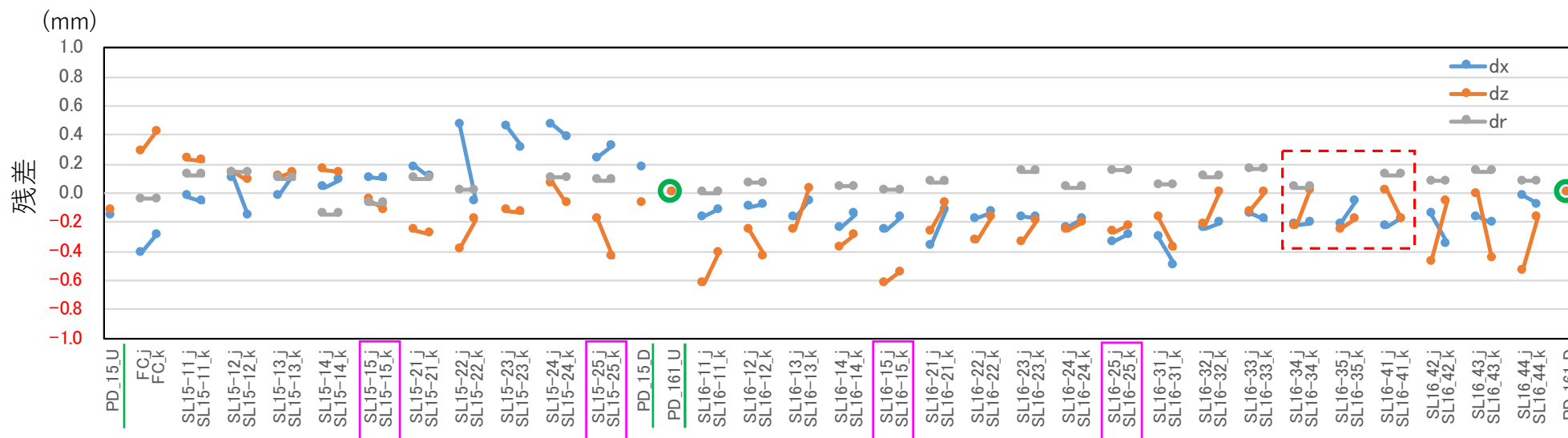


図11 復元後のDCソレノイド円筒中心位置（加速ユニット測量基準から求めた設計値との残差、放射線シールドなし）

- ・ソレノイド復元後、全数を取り出し前と同様の方法で測定し解析した結果（16基準ビーム軸との残差）が図11 *放射線遮蔽シールドなし
- ・FaroARMの三脚固定改善後のSL_16_34 ~ 41は-0.25 ~ 0.04 mm
- ・全体として±0.6 mmの範囲に分布している
- ・取り出し前と復元後の差分（図12）から今回の作業で移動したソレノイド（赤色）は±0.2 mm以内で復元されていることが分かる
- ・移動していないソレノイドも全て±0.2 mm以内

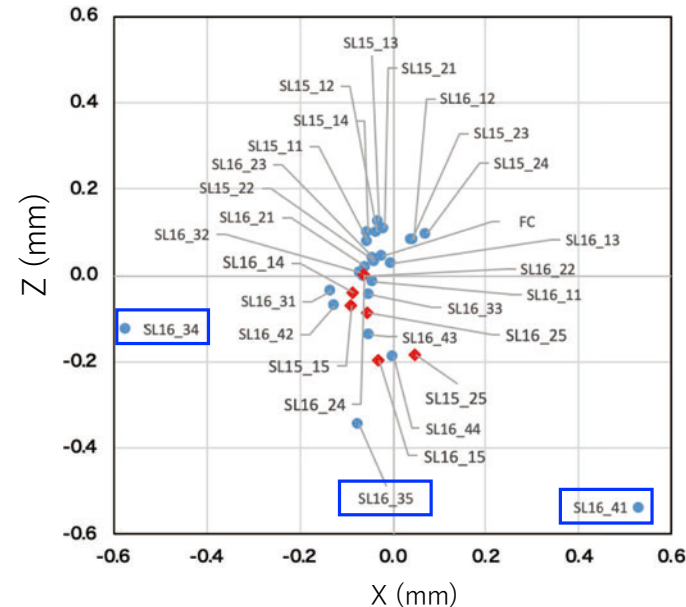


図12 DCソレノイド取り出し前と復元後の差分

まとめ

DCソレノイドの設置状態

- (1) 陽電子捕獲部のDCソレノイドの磁場を変化させると陽電子ビームの軌道が最大3.8 mm変わることが2020年2月に確認されており、その原因がDCソレノイドのミスアライメントによるものかを確認するため、2020年7～9月の長期保守期間にFaro ARMによる円筒測定とレーザートラッカー測量を行ない解析ソフトウェア（SA社USMN）で配置状態を確認した。
- (2) ソレノイド位置測定と解析により、ビーム軸に対し上流から26台目（SL_16_41）の下流位置が $dx(\max)=0.97$ mm、 $dz(\max)=0.66$ mmの残差と1.18 mradの傾きを持つ結果が出た。SL_16_34 ~ SL_16_41についてはFaroARMの設置状態改善により2回目以降の dx 、 dz が約0.2 mmに減少したことから、FaroARMの設置が不十分で誤差を多く含んだ結果であると判断した。
- (3) 他の dx は全て ± 0.5 mm、 dz は0.66 mmの1箇所を除き ± 0.5 mmの範囲に収まっていた。
- (5) ビーム試験で2 mmオフセンターのビームを通して軌道のずれが発生しなかったことから、ほぼ ± 0.5 mmに設置されたDCソレノイドは軌道ずれの主な原因でないことが明らかとなった。

DCソレノイド内側へのBPM、空芯コイル取り付け

- (1) 陽電子捕獲部にビーム軌道調整用の電磁石やビームモニターが無く運転上の困難があったため、対策として陽電子捕獲部のDCソレノイド内4箇所にはBPMと空芯コイルをそれぞれ取り付けた。
- (2) BPMと空芯コイルはアルミ合金製の2分割サポートベースの内側に、さらにそのサポートベースをソレノイドの内側にレーザートラッカー2台を使って ± 0.15 mmの精度で設置した。
- (4) アルミ合金製のサポートベースとソレノイドの位置決め固定は上下流側各3本のボルトで行なった。しかし固定時に12.5Nmでの締め付けたところ ~ 0.2 mmの変形が確認できたため、最終的に締め付けトルクを10 Nm（変形量 ~ 0.1 mm）にして固定した。回転方向の調整に苦労したことも含めて設計不十分な箇所があった。
- (5) BPM、ステアリングコイルを設置したことにより陽電子の電荷量は入射器終端において1.3 nC/bunch（2020/7）から3.0 nC/bunch（2021/7）に改善された。* THOB04 榎本氏の発表参照

DCソレノイドの復元

- (1) 事前に用意した作業治具が問題なく使用でき、ソレノイドの設置作業時のスライド量とベローズ長が適切であったことで、作業は順調に進めることができた。
- (2) ソレノイドの復元時にもレーザートラッカーを使用し、極力元の状態に戻すようにアライメントを行なった。
- (3) ソレノイド取り出し前と復元後の位置の差を ± 0.2 mmに収めることができた。
- (4) 更なる設置精度の改善に対しては、15及び16の加速ユニット架台アライメントが考えられる。

