

## cERL 周回部電磁石のアライメント

### MAGNETS ALIGNMENT FOR THE cERL RECIRCULATION LOOP

久米 達哉<sup>#</sup>, 原田 健太郎, 長橋 進也, 中村 典雄, 島田 美帆, 上田 明

Tatsuya Kume <sup>#</sup>, Kentarou Harada, Shinya Nagahashi, Norio Nakamura, Miho Shimada, Akira Ueda

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

We had installed and aligned 80 magnets and their girders which compose the cERL recirculation loop by using a laser tracker, T3 (API; Range of measurements, 20 m in radius; Absolute accuracy of a 3D coordinate, 5 ppm-2 $\sigma$ ) and a tilting level, N3 (Wild; 1 km double-run levelling, 0.2 mm-2 $\sigma$ ), referring 40 surveying references on wall of the accelerator room. Because of short and restricted construction schedule, the magnets were precisely aligned in their first installation process with the accuracy of better than  $\pm 0.1$  mm and  $\pm 0.1$  mrad against their neighboring references. Then the magnets were disassembled and reassembled for installing beam pipes into them. As the results, the magnets were aligned with the position accuracies of around  $\pm 0.5$  mm, direction accuracies of better than  $\pm 1$  mrad, and level accuracies of around  $\pm 0.2$  mrad.

#### 1. 諸言

エネルギー回収型ライナック(ERL)は、既存の蓄積リング型光源では到達不可能な、超高輝度、短パルス光源を実現するための次世代の放射光源として期待されている[1]。コンパクトERL(cERL)[2]は、ERLの実現に必要とされる加速器技術の確立と、低エミッタンスかつ大電流の電子ビームの生成、加速、ビーム周回の実証のための試験施設として建設された。cERLでは、2014年3月にエネルギー回収運転を実現した後ビーム調整運転が行われ[3]、現在、2014年度後半にかけて行われるレーザーコンプトン散乱実験に向けたアップグレード作業が行われている。

cERL周回部の建設では、高品質な加速電子ビームを得るために、周長約90mの周回部ビームラインを設計値通りに設置し、既設の入射部ビームラインと主空洞に精度良く接続する必要があった。ここでは、cERL周回部ビームラインを構成する電磁石の設置とその精密アライメントについて述べる。

#### 2. 工程概要

cERL周回部の建設は、2013年6月のERL入射部の運転終了後となる7月初めから、同年11月半ばに予定された加速空洞冷却開始までの間の極めて短期間に計画されたため、各作業工程は短期間に集中する他工程との干渉を避けながら、同時進行させる必要があった。中でも周回部ビームラインの骨格となり、他の構成機器の位置基準となる電磁石の設置は、建設の初期段階において完了させる必要があった。そのため、一般的には、ビームライン建設の最終段階において、電磁石の精密アライメントが行われるのに対して、cERL周回部の建設では、電磁石の設置時に精密アライメントを完了させ、その後に電磁石を半割してビームパイプをインストール、ベーキングした後に電磁石を戻す、といった変則的

な工程を採用することで、他の作業工程との干渉を緩和し、電磁石精密設置後の位置変動をある程度許容した上で、全体の工期を短縮した。

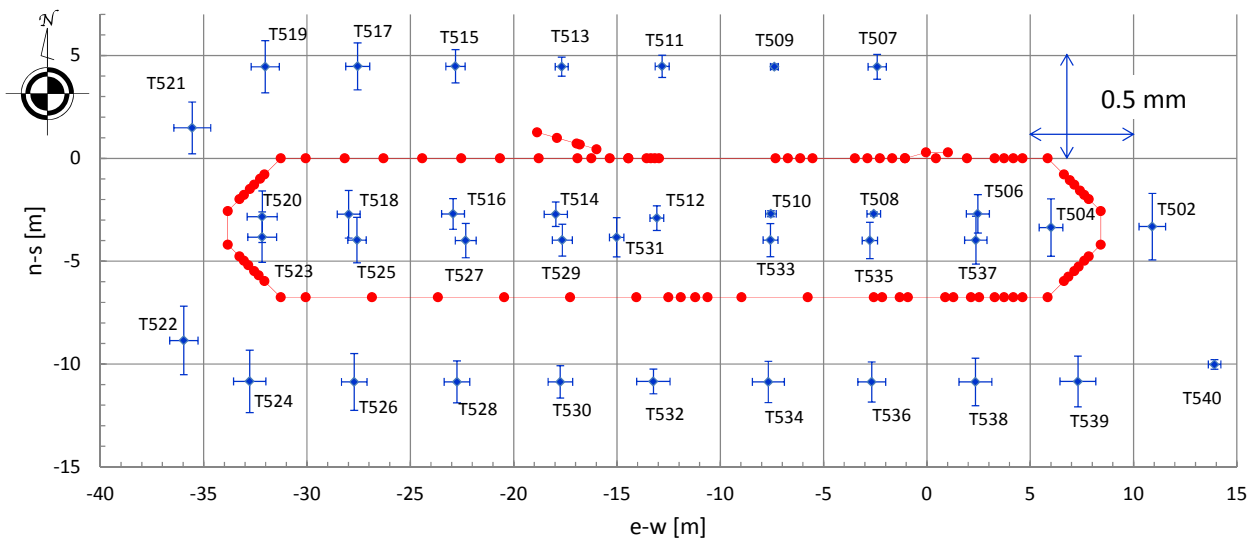
cERL周回部の電磁石設置では、レーザトラッカと呼ばれる光学式の精密測距測角器、T3(API; 測定半径、20m; 3次元位置精度、5 ppm-2 $\sigma$ )と、ティルティングレベル、N3(Wild; 1km往復差、 $\pm 0.2$  mm-2 $\sigma$ )を主として用いて、電磁石に取り付けた測量基準座上のCorner Cube Reflector(CCR)位置とそれらから求められる角度を、加速器室内壁面の測量基準点の座標をもとに割り出した設置位置に対して、それぞれ $\pm 0.1$  mm、 $\pm 0.1$  mrad以内とすることを目標として、全80台の電磁石とそれらの架台を設置した。

#### 3. 基準点測量

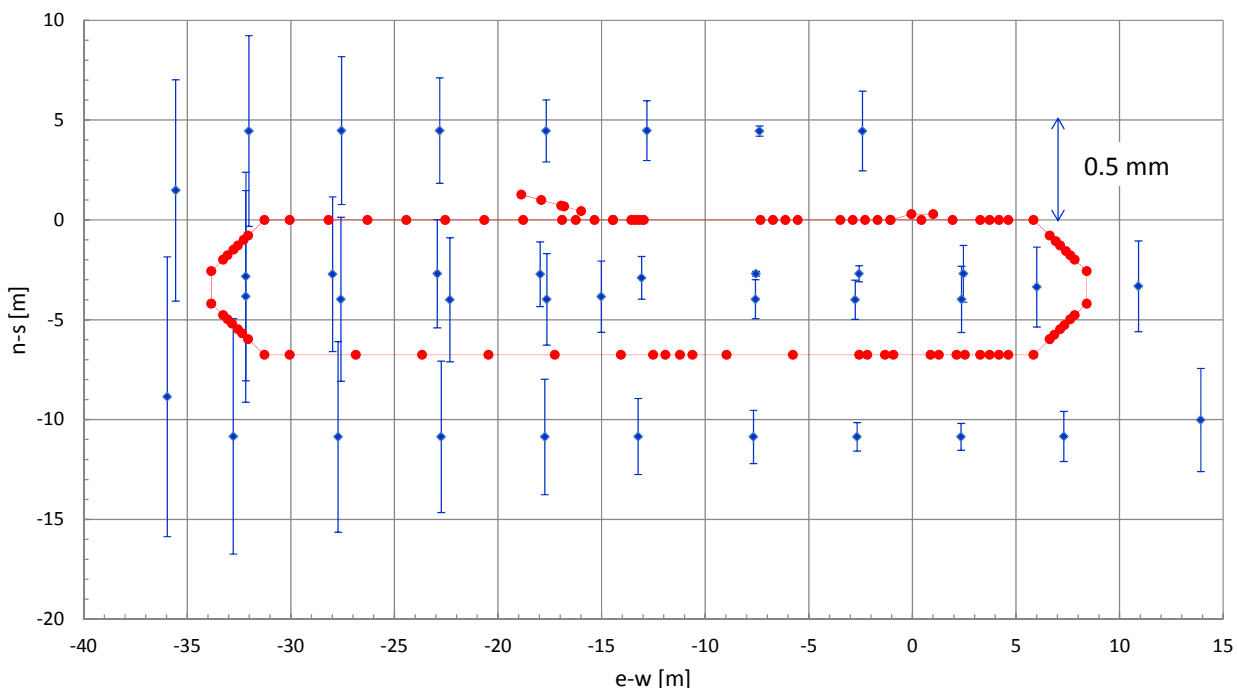
cERL加速器室の壁面には、床面上1200mmに定義されたビームライン上約500mmの位置に、加速器室全体にわたり約5m間隔で計40カ所、1.5 inch CCR用基準座が測量基準点として設置されている[4]。これらは、2012年11月の設置時において、N3により全点の高さが精密水準測量され、さらに入射部付近の10点については、レーザトラッカにより水平面内座標値が求められている。

今回、周回部ビームラインを構成する電磁石の設置に先立ち、既設機器の陰になるなどして使用できない数点を除いた全ての測量基準点について、それらの座標をレーザトラッカ、T3にて求めた。測定は入射部ビームラインと周回部ビームラインとの交点位置に定義された座標原点付近から、周回部ビームラインに沿って反時計回りに移動しながら行い、1~4回目の測定では7ヶ所、5回目の測定では11ヶ所の測定位置で得られた測定値を、ビームライン一周分での閉合差が小さくなるようにベストフィットすることにより接続して、得られた値を各測定回における測量基準点の座標値とした。5回の繰返し測定で得られた座標値の標準偏差を、水平面内位置、

<sup>#</sup> tatsuya.kume@kek.jp



(a)



(b)

Figure 1. Standard deviations of the derived positions of reference points for five-times of repeat measurements by using a laser tracker, T3. (a). Those for two directions of e-w and n-s on a horizontal plane. (b). Those for heights. e-w axis is defined to be the north straight section of the loop, while n-s axis is defined to be perpendicular to the e-w axis, and the cross point between the injector beam line and the loop is defined to be an origin. Blue rhombuses express reference points. Red circles express centres of magnets, which form the loop. Error bars on each reference point express standard deviations magnified to  $10^4$ -times.

および、高さについて、それぞれ、Figs. 1 (a), (b)に示す。水平面内の2方向の位置については、ともに標準偏差が平均値で0.1 mm未滿、最大でも0.2 mm未滿となっているのに対して、高さについては、平均値で0.2 mmを超え、最大で0.7 mmと大きくなっ

ている。Figures 1 (a), (b)では、青色菱形で壁面の基準点位置、エラーバーでそれらの位置の繰返し測定時の標準偏差、赤丸で新たに建設する周回部およびダンプリンを形成する電磁石中心位置を示す。基準点位置の添え字は基準点名を示す。

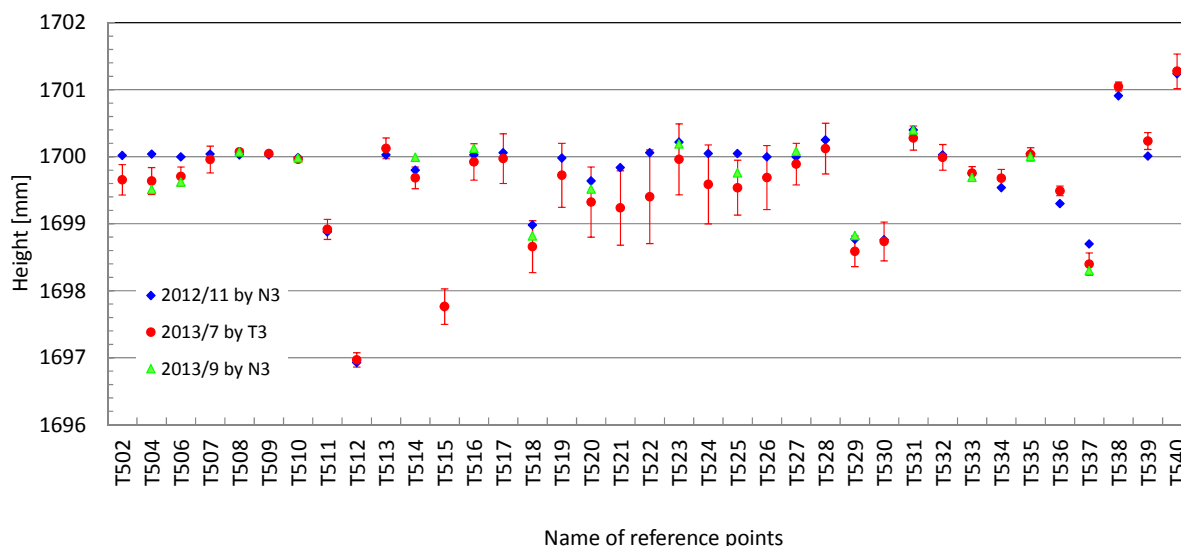


Figure 2. Height for each reference point. Blue rhombuses express those obtained in Nov. 2012 when each reference was installed, Red circles express those obtained in July 2013 before installing magnets, and green triangles express those obtained in Sep. 2013 when magnets were installed.

測量基準点の高さに着目し、基準点設置時(2012年11月)、電磁石設置前(2013年7月)、さらに、比較対象として電磁石設置時(2013年9月)に得られた値を Fig. 2 に示す。基準点設置時と電磁石設置時の測定値は N3、電磁石設置前(2013年7月)の測定値は T3 によるもので、後者は Fig. 1(b) に示されたものである。基準点設置時と電磁石設置前の値を比較すると、T502~T506、T518~T526 にかけて、差が 0.5 mm 程度とやや大きくなっているが、全体的にはほぼ同様の傾向が見られる。このことから、基準点設置時から電磁石設置時までの間に、基準点およびそれらが設置される加速器室壁面に、mm レベルの大きな変動は発生していないと考えられる。

一方、三角測量に基づき座標値を求めるレーザトラッカを用いて、広範囲にわたり同様の高さの点を

測定した場合、高さ方向の測定値の誤差が拡大する。このような理由から、一般的に加速器構成機器の高さ方向の位置合わせは、N3 のような重力方向を基準とする機器を用いて行われる。実際に Fig. 1 (a), (b) を比較しても、高さの標準偏差が、水平面内位置の標準偏差に対して大きくなっている。

以上を踏まえて、周回部の電磁石設置では、測量基準点の座標値として、水平面内位置は電磁石設置前(2013年7月)に、T3 にて測定し得られた座標値の平均値を、高さは基準点設置時(2012年11月)に N3 にて測定し得られた値を、それぞれ用いた。

Figure 3 に既設の入射加速空洞(Inject ACC)と主加速空洞(Main ACC)それぞれの真空槽外側の測量基準座、入射部ビームライン上に設置された電磁石上の測量基準座(5Q)、および、床面上の墨出し基準点

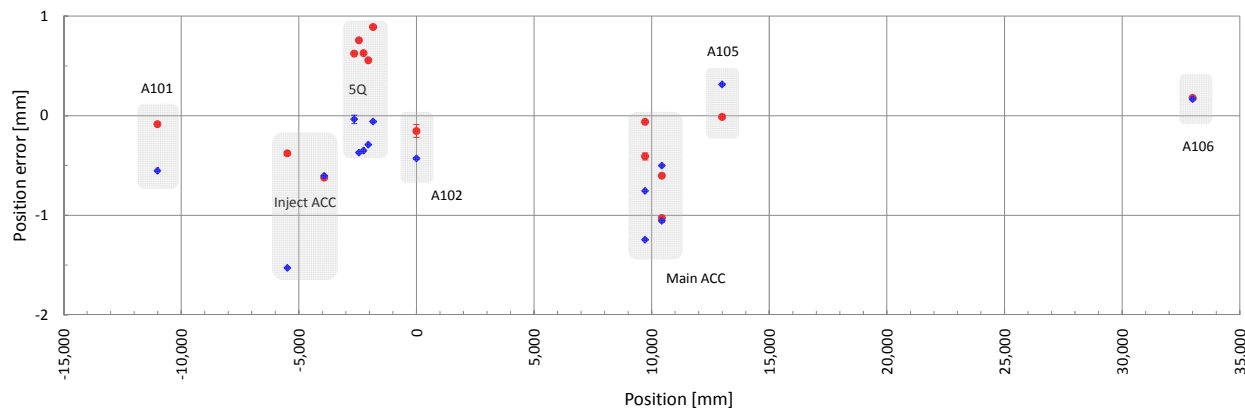


Figure 3. Positioning errors on a horizontal plane for existing instruments against the coordinate based on the reference points on the wall. The horizontal axis expresses distance from the origin along the beam line, where minus expresses the position on the injector beam line. Blue rhombuses stand for errors for the direction perpendicular to the beam direction, while red circles stand for errors for the beam direction. “5Q” are for five magnets. “A101”, “A102”, “A105”, and “A106” are for references on floor. “Inject ACC” and “Main ACC” are for reference points on their vacuum jacket.

(A101, A102, A105, A106)について、壁面上の測量基準点をもとに定義された座標系に対する位置ずれ量を示す。図より、入射および主加速空洞を納める真空槽外側の測量基準座を除き、既存機器の位置ずれ量は $\pm 1$  mm 未満になっていることがわかる。入射および主加速空洞については、真空槽に対して空洞位置を調整することが可能であることから、壁面上の測量基準点の座標値をもとに、周回部ビームラインの構成機器をアライメントすることで、全ての既存機器を、新たに作成する周回部ビームラインと問題無く接続することが可能と考えられた。

さらに、壁面の測量基準点の座標値をもとに、機器設置用の基準線を描くために必要な基準点を、機器設置場所となる加速器室床面上に移した。床面上の基準点は、T3 を用いて近傍の壁面上の測量基準点から求められる目標値に対して、 $\pm 0.1$  mm 程度で位置決めした。このように位置決めされた基準点間を直定規で結び得られた基準線は、目標値に対して $\pm 1$  mm 程度で描かれているものと期待される。これらの基準線は、数 mm 程度の設置誤差が許容される架台等の位置および角度基準、さらに、それらを床面上に固定するためのアンカー穴位置の基準とした。

## 4. 電磁石精密設置とアライメント評価

### 4.1 電磁石精密設置

電磁石の精密設置では、電磁石上に取り付けられた測量基準座上に載せた CCR 中心位置とそれらから求められた角度を、近傍の壁面上の測量基準点から求められた目標値に対して、それぞれ $\pm 0.1$  mm、 $\pm 0.1$  mrad 以内とすることを目指した。このとき、水平面内位置と角度は、レーザトラッカ、T3、高さは、ティルティングレベル、N3、水平は精密水準器、DL-M1 (新潟精機; 測定範囲,  $\pm 5$  mm/m; 読み取り分解, 0.01 mm/m) を用いて合わせた。

測量基準座を取り付けることのできない一部の電磁石については、トータルステーション NET05X(ソキア; 測角精度, 0.5 arcsec; ノンプリズム時 100 m までの測距精度, 1 mm+1 ppm) を用い、電磁石の割面位置などにより位置と角度を合わせた。トータルステーションについては、測量基準座が 1 つのみの電

磁石の水平面内の角度合わせにも用いた。

電磁石基準座の座標測定値を設計値にベストフィットした場合のずれ量を Fig. 4 に示す。これらは、周回部電磁石位置の精密設置時における設計値からのずれを示すものと考えられる。ここで、水平面内の位置ずれ量である  $dx$ ,  $dz$  は T3、高さ方向の位置ずれ量となる  $dy$  は N3 による測定値をもとに導出したものである。原点付近、および、77 m 以降に見られる 0.5 mm 程度の  $y$  軸方向 (鉛直上下方向) のオフセットは、付近の壁面に設置された測量基準点の高さずれによるものと考えられる。これらは、Fig. 2 に示される測量基準点 T504, T506, T537 に見られる 2012 年 11 月と 2013 年 9 月の測定値間の約 0.5 mm の差に相当し、この期間の基準点の高さ変化に起因するものと考えられる。一方、5~8 m 地点に見られるずれは、当該位置に設置した電磁石が測量基準点を持たないことから、吊りボルト穴位置と割面位置をもとに測量したために発生したものと考えられる。これらを除き、cERL 周回部の電磁石は、精密設置により設計値に対して $\pm 0.1$  mm 未満にアライメントされたものと考えられる。

### 4.2 電磁石アライメント評価

精密設置された電磁石はビームパイプのインストールのため東西アーク部の大型偏向電磁石と南側直線部中央の周長補正電磁石など半割不要のものを除いて一旦半割され、ビームパイプをインストールした後に戻される。この間、高い真空度の要求される主空洞前後と入射合流部付近のビームパイプについては、100 数十~200°C 程度でベーキングされた。

これらの後、電磁石基準座位置と角度のずれ量を最終測量により確認し、電磁石のアライメント評価を行った。その結果を Figs. 5 (a), (b) に示す。これらから、電磁石の測量基準座位置は、当初の精密設置時に実現された $\pm 0.1$  mm 程度の設計値からのずれ量から悪化したものの、設計値に対して $\pm 0.5$  mm 程度の位置精度と、 $\pm 0.2$  mrad 程度の水平精度、および、1 mrad 未満の水平面内角度精度が得られていることが示された。最終測量時のずれ量の拡大は、電磁石

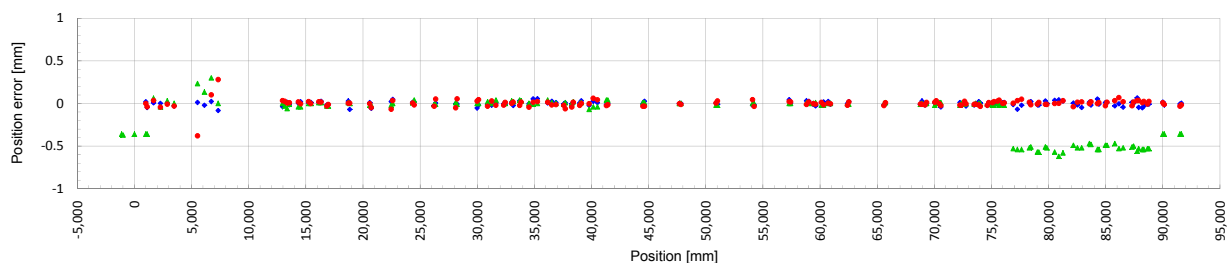


Figure 4. Position errors after the precision alignment of magnets. Horizontal axis expresses distance from the origin along the beam line for CCW direction, where minus expresses the position on the injector beam line. Blue rhombuses stand for  $dx$  which express error for  $x$  direction (perpendicular to the beam direction in a horizontal plane), green triangles stand for  $dy$  which express error for  $y$  direction (perpendicular to the beam direction in a vertical plane), and red circles stand for  $dz$  which express the error for  $z$  direction (beam direction), respectively.

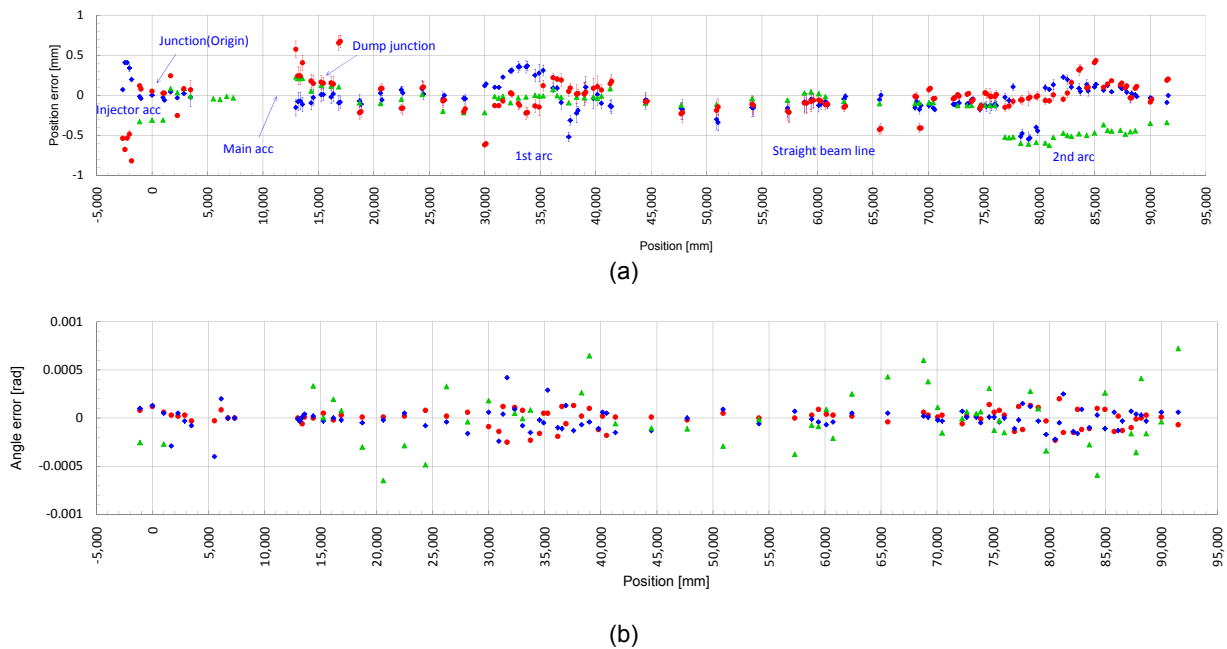


Figure 5 (a). Position errors of the reassembled magnets. Horizontal axis expresses distance from the origin along the beam line for CCW direction, where minus expresses the position on the injector beam line. Blue rhombuses stand for  $dx$  which express the error for  $x$  direction (perpendicular to the beam direction in a horizontal plane), green triangles stand for  $dy$  which express the error for  $y$  direction (perpendicular to the beam direction in a vertical plane), and red circles stand for  $dz$  which express the error for  $z$  direction (beam direction), respectively. (b). Angle errors of the reassembled magnets. Blue rhombuses stand for pitch which express the angle error around the  $x$  axis, green triangles stand for yaw which express the angle error around  $y$  axis, and red circles stand for roll which express the angle error around  $z$  axis, respectively.

半割り・戻し時の再現性のずれや、ビームパイプベーキング時の熱による電磁石の変動などに起因するものと考えられる。

## 5. 結言

cERL 周回部の建設では、限られた短期間の工期に集中する工程間の干渉を緩和し、全体の工期を短縮するために、位置変動をある程度許容した上で、精密設置後の電磁石を半割りし、ビームパイプをインストール、ベーキングし、電磁石を戻す、といった変則的な工程を採用した。

建設当初に行われた電磁石の精密設置では、加速器室内壁面の測量基準点の座標をもとに割り出した設置位置に対して、それぞれ $\pm 0.1$  mm、 $\pm 0.1$  mrad以内とすることを目標として、ビームラインの骨格となる全 80 台の電磁石とそれらを搭載する架台を精密設置した。その結果、測量基準点のずれ等の影響を受けた一部を除き、電磁石を設計値に対して $\pm 0.1$ mm 程度に精密設置することができた。

最終測量により、半割り戻し後の電磁石は、設計値に対する $\pm 0.5$  mm 程度の位置精度と 1 mrad 未満の水平面内角度精度、さらに、 $\pm 0.2$  mrad 程度の水平精度でアライメントされていることが示された。ずれ量の拡大は、電磁石半割り・戻し時の再現性のずれ、ビームパイプのベーキング時の熱による電磁石の変動などに起因するものと考えられる。

## 謝辞

加速器アライメント法に関し、理化学研究所 松井佐久夫氏の助言を得た。

電磁石設置とアライメント作業に際し、KEK 機械工学センター 大久保隆治、工藤昇、斎藤信二氏、および、機械工学センター、KEK 加速器研究施設 荒木栄、大澤康伸、柿原和久、菅原龍平、増澤美佳、山岡広氏、KEK 素粒子原子核研究所 中村勇氏、KEK 放射線科学センター松村宏氏、および、放射線科学センター、さらに、cERL 開発メンバーの協力を得た。

壁面基準点設置および測量作業は、(株)パスコ、電磁石設置およびアライメント作業は、(株)日立テクノロジーアンドサービスによる。

## 参考文献

- [1] S. Adachi, et.al, "Energy Recovery Linac Conceptual Design Report," KEK Report 2012-4, (2012).
- [2] 中村ら, "コンパクト ERL の進捗状況," 第 11 回日本加速器学会年会, SUP014, (2014).
- [3] 島田ら, "コンパクト ERL のコミッションング," 第 11 回日本加速器学会年会, SAOLP1, (2014).
- [4] 久米ら, "測量網を用いた加速器のアライメント評価における誤差見積もり," 第 10 回日本加速器学会年会, SUP114, (2013).