

メインリング電磁石システム

0. はじめに

電磁石は加速器要素の中でも荷電粒子の軌道制御するうえで欠かせない重要な要素の一つである。本講義では、SuperKEKBの主リング(Main Ring：MR)の常伝導電磁石システムについて紹介する。

SuperKEKBではKEKBの約40倍のルミノシティを達成するために、「ナノビーム衝突」方式が採用された。これに伴い、MRの一部の電磁石が新規に製作されトンネル内に据え付けられた。また、ラティスの変更に伴う電磁石のレイアウト変更も行われた。第1章では、SuperKEKBの仕様要求を満たすため、KEKB時から大きく改修された箇所を中心に紹介する。

MRには2000台を超える電磁石が配置されている。ナノサイズのビームを制御するためには、これらの大量の電磁石を指定された場所に精度よくアライメントする必要がある。しかし、SuperKEKBトンネルは1周3kmの円形トンネルであるため、全部の磁石を一度に見渡すことはできない。第2章ではこのような大規模な電磁石システムのアライメント方法について紹介する。第2章はSuperKEKB電磁石グループの増澤美佳氏に執筆をお願いした。

MRに設置されている電磁石の内1750台は水冷式電磁石磁石である。電磁石の温度を一定に保つことは、安定した磁場の励起という点において非常に重要である。1750台の電磁石へ安定した冷却水供給を可能にするのが電磁石冷却水システムである。第3章では、大規模な冷却水システムを運転するにあたり気を付けるべき事項を中心に紹介する。

1. メインリング電磁石

SuperKEKB^{1, 2, 3)}は次世代の電子陽電子 B フォトリマシんで、「ナノビーム」方式⁴⁾を使用して KEKB の 40 倍のピークルミノシティの達成を目指している。KEK の敷地内の地下 11 m に建設された直径約 1km、周長 3km の円形トンネル内に、7GeV の電子リング(HER)と、4GeV の陽電子リング(LER)が設置されている。Fig. 1.1 は SuperKEKB のトンネルの全体図である。トンネルは実験室両側約 100m の「直線部」と各直線部をつなぐ「アーク部」から成り立っている。トンネル内には、直線部とアーク部がそれぞれ 4 カ所あり、2500 台以上の常伝導電磁石が設置してある。筑波直線部に設けられた衝突エリアには Belle II 検出器が設置されており、電子陽電子ビームの衝突が行われる。

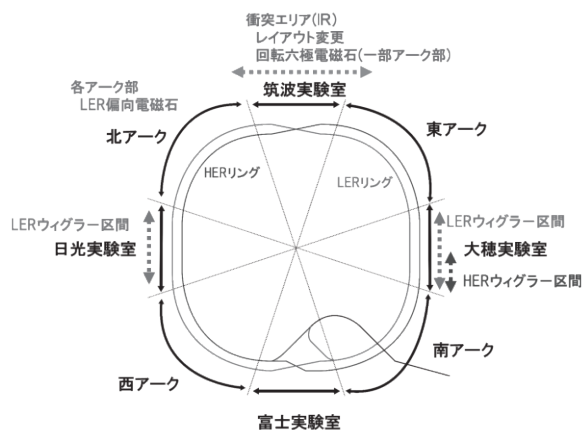


Fig. 1.1 SuperKEKB トンネルの概略図

SuperKEKB 加速器はピークルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を実現するためには、KEKB の MR 電磁石システムを大幅にアップグレードする必要があった。しかし、MR すべての電磁石を新規に製作するには莫大なコストがかかるため、できる限り KEKB 電磁石を再利用することを前提として、SuperKEKB のラティスが考えられた。しかし、低エミッタンスラティスやナノビーム衝突

の実現のため⁵⁾、以下の 4 つの大規模なアップグレードが行われた⁶⁾。

- 1) 衝突エリア全体の新しいビームラインの新設
- 2) 陽電子リング内の主偏向電磁石の交換
- 3) LER リングのウィグラー区間のレイアウト変更と HER リングのウィグラー区間の新設
- 4) LER リングへの回転六極電磁石の導入

これらの変更に伴い 400 台を超える主電磁石が新しく設計・製造された。Table 1 は SuperKEKB で新規に作製された主要電磁石のパラメータの情報である。 $g/2$ は、偏向電磁石のハーフギャップもしくは磁石のボア半径、 L_{eff} は磁石の有効長を示している。

この他にも HER および LER には 800 個を超える垂直および水平補正電磁石があり、LER のアンテナチャンバー(電子雲対策用に製作された新しいビームチャンバー)に合わせて、約 250 個の垂直補正電磁石を新しく設計し製作する必要があった。Fig. 1.2 は、電子リング (HER) と陽電子リング (LER) の再利用された電磁石と新規に製作された電磁石の割合を示している。



Fig.1.2 新規電磁石と再利用電磁石の数の比率

Table 1.1 新規に製作された電磁石のパラメータ

Ring	Magnet (main locations)	g/2 (mm)	Leff (m)	Max. B, B', B'' (T),(T/m),(T/m ²)	I(A)×# turns/pole	# of magnets (Phase I)
HER	B (LCC sections)	55	3.96	0.3	1325×10	11
	B (IR)	49	3.60/2.23	0.112	500×10	1/1
	Q (LCC, etc.)	50	1.12/0.57	18.0	700×26	2/33
	Q (Arc sections)	50	0.82	12.8	500×26	8
	Q (IR)	55	0.53	2.0	500×6	2
	Sx (LCC sections)	56	0.608/0.509/0.335	472/465/447	600×22	4/4/2
LER	B (Arc sections, etc.)	55	4.19	0.19	840×10	114
	B (LCC sections)	55	3.96	0.3	1325×10	5
	B (IR)	55	2.2/1.6	0.223	1000×10	3/1
	Wiggler	55	0.34/0.22	1.18/0.76	1400×36	56/112
	Q (LCC, etc.)	83	0.58	6.3	500(600)×35	12

1.1. 衝突点周辺のレイアウト変更

SuperKEKBでは、ナノビーム衝突を実現するために、最終集束超伝導電磁石の大幅な変更が行われた。これに伴い衝突点周辺の常伝導電磁石も大きくレイアウトが変更された(Fig. 1.3)⁷⁾。衝突点近傍における両リングの間隔は非常に狭く、空間的制約が他の電磁石よりも厳しい。このような状況で要求される磁場品質を満足する電磁石が新規に設計・製作された。

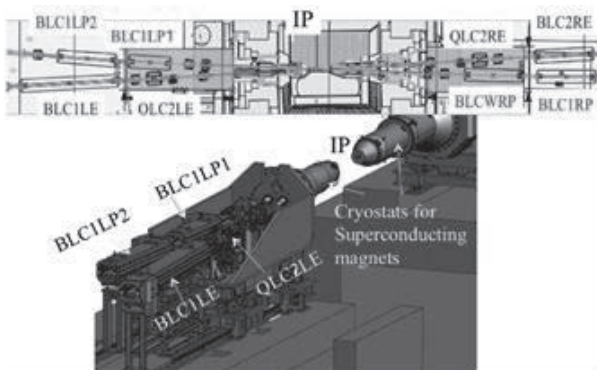


Fig. 1.3 筑波衝突点付近のレイアウト

筑波エリアの衝突点近傍には4種類の常伝導電磁石(BL、BC、QL、QK電磁石)が配置されている。BL電磁石は水平方向、BC電磁石は垂直方向の偏向電磁石である。QL磁石は四極磁石、QK磁

石はスクュー四極電磁石である。これらの磁石は、0.5 mm または 1.0 mm の珪素鋼板を積層させ製作した。BL磁石は1500 mm、2130 mm、3500 mmの異なった3種類の長さ電磁石が必要とされたが、コスト削減のため同じ形の珪素鋼板が使われている。衝突点の両側では、両リングのビームラインが接近しているため、衝突点付近に配置される磁石に与えられる幅の空間スペースは440 mmと非常に狭い。さらに、真空ポンプやベローズの設置スペースを確保するため、磁石長手方向に関してコイルは鉄ヨークから90 mm以内の空間に収まるように設計する必要があった。Table 2に各種の磁石の機械的パラメータを示す。

Table 1.2 各磁石の機械的パラメータ

Magnet ◦	Half gap or bore radius ◦	Lamination length ◦	Yoke width ◦
BL ◦	49 mm ◦	1500/2130/3500 mm ◦	438 mm ◦
QL ◦	55 mm ◦	500 mm ◦	338 mm ◦

このような空間的な制約に加えオプティクスから要求される磁場品質も満たさなければならない。マルチポールエラーの許容範囲はダイナミックアパーチャーのシミュレーションから決定される。シミュレーションの結果からマルチポール

エラーはBLで1%、QLで0.5%以下という要求がなされた。Table 3は磁場とコイルに関するパラメータである。

Table 1.3 各磁石の磁場とコイルのパラメータ

Magnet	Required Max. B or B'	B3/B1, or B6/B2	Max. current × turns/pole
BL	0.112 / 0.223T	1%@50 mm	500/1000A × 10
QL	2.04 T/m	0.5%@50 mm	500A × 6

Fig. 1.4にBL電磁石の図面を示す。電磁石のアーチャーは、真空ビームダクトを収めるのに十分な大きさが必要である。一方、IRにおけるスペースの制限のために、磁石の全幅は440mm以下とされた。その結果、27mmという非常に薄いリターンヨーク幅で磁石を設計することを強いられた。しかし、磁場シミュレーションソフトOpera3Dを使用してフィールド計算した結果、鉄のサチレーションはなく、必要とされる最大磁場強度が得られることが確認された。このように、大規模な加速器においては他の要素の兼ね合いなどもあり必要な磁場強度や磁場品質を満たしつつ、空間的制約をクリアするように磁石の設計を行う必要がある。

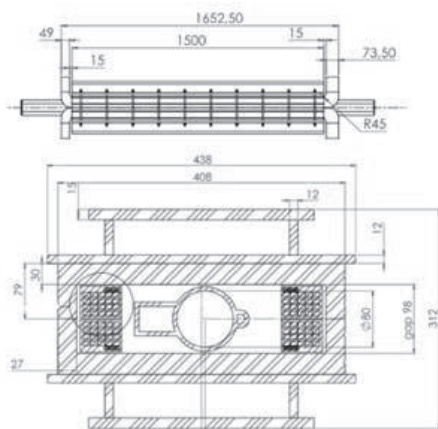


Fig.1.4 BL電磁石の図面

Fig. 1.5にQL磁石の側面図と断面図を示す。全幅は338mm、一番長い場所での鉄ヨークの長さは500mmになる。

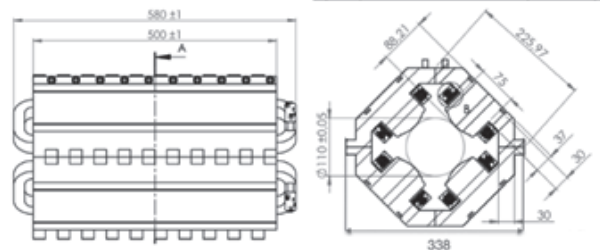


Fig. 1.5 QL電磁石の図面

製作された電磁石の磁場品質をロングフリップフロップコイルとローテーティングコイルを用いて評価した。Fig. 1.6はBL磁石のビーム進行方向に対して垂直な水平方向の磁場プロファイルである。X = 0 mmにおける積分磁場で規格化してある。BL磁石は窓枠型の偏向磁石であるため、対象な磁場分布を持っていると思われたが、図に見られるように長さ1500mmのBL磁石においてxプラス方向で磁場の非対称性が確認された。考えられる原因は、磁石にコイルに電流を供給するための電極プレートが原因と考えられる。Fig. 1.6からxプラス方向はこの電極側であることがわかる。BL(1500mm)磁石は、電極から何らかの影響を受けて磁場の非対称性が生じたと考えられる。一方、3500mm磁石は磁石が長い分積分磁場が強くなり、電極の影響が小さくなったと考えられる。ただし、どちらの磁石も要求された均一領域は満たしている。

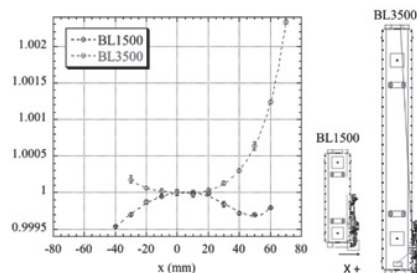


Fig. 1.6 BL磁石の積分磁場の横方向分布

4 極磁石の磁場評価はハーモニックコイルを用いて行われた。Fig. 1.7 に主成分の 4 極成分 ($n=2$) で規格化されたマルチポールの大きさを示す。4 極成分の allowed multipole は 12 極、20 極、 $\{4 \times (2n+1)\}$ 極である。図の赤い点線は磁場品質からの要求値で、各マルチポールはこの点線以下に抑える必要がある。測定の結果、12 極成分を含めすべての高次のマルチポール成分が要求を満たしていることがわかる。

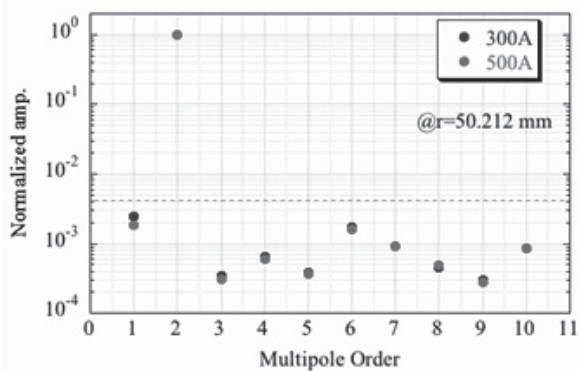


Fig. 1.7 QL 電磁石のマルチポールエラー

ビーム軸方向の磁場のプロファイルは、小型のフリップフロップコイルを z 軸に沿って移動させることで得ることができる。BL1500 磁石のマッピングデータを Fig. 1.8 (上) に示す。Fig. 1.8 (中) は中央部分を拡大したもので、凸凹した構造が見られる。これは、電磁石ヨークの上半分と下半分を接続するサイドアイアンボルトの位置に対応しているように見える (Fig. 1.8 (下))。ボルトの数と凸凹の山の数は一致しており、他の BL 磁石 BL2130 と BL3500 にもこのような凸凹構造が見られる。磁場のシミュレーションにおいても磁石の上半分と下半分との間の周期的なギャップがこのようなプロファイルを作り出す可能性が示されたことからサイドボルトにより上下の鉄ヨークの不均一な接触が作り出すものであると考えられる。この不均一性は 10^{-3} 未満と小さく、ま

たビームの進行方向の変化であるためビームに対して問題を起こすほどではない。

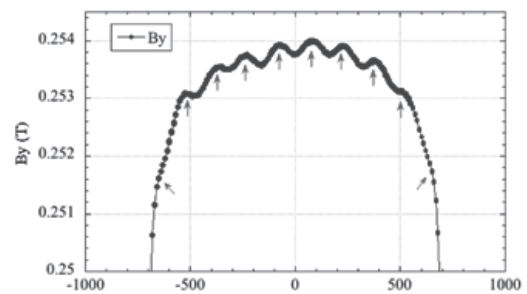
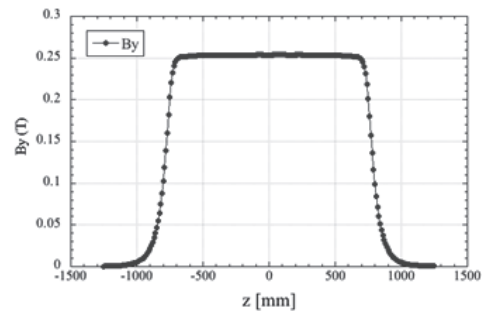


Fig. 1.8 上: BL 電磁石のビーム軸方向の磁場プロファイル、中: フラットトップの拡大図、下: BL 電磁石のボルト位置

磁場有効長は、マッピングデータから求められた積分磁場と NMR で測定された磁石中心の磁場を用いて計算される。Fig. 1.9 に BL 磁石と QL 磁石の中心磁場と有効長をプロットしたグラフを示す。大電流において線形の励磁曲線が得られていることから、鉄ヨークは飽和していないことがわかる。また、有効長は励起電流にわずかに依存することがわかった。Table 1.4 は、SuperKEKB IR 用の IR 近傍電磁石の磁場測定結果をまとめた。電界強度と有効長は、Opera 3D の計算とよく一致しており、磁場品質は要求された許容範囲を十分満たしていることがわかる。

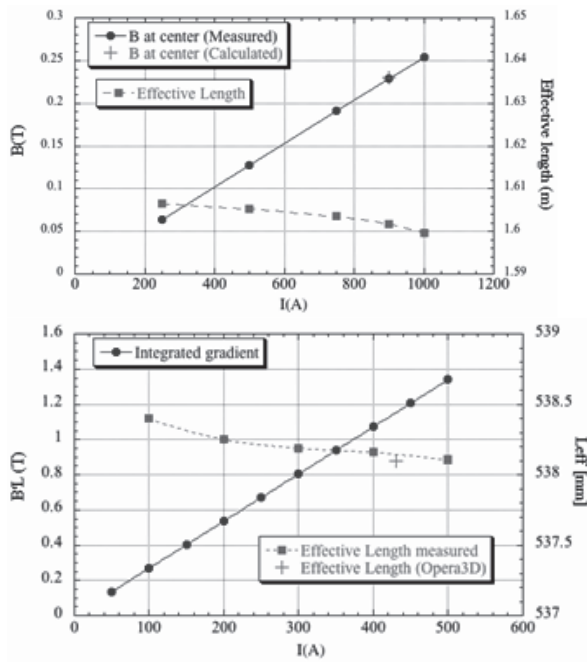


Fig. 1.9 BL 及び QL 磁石の有効長

Table 1.4 IR 電磁石の磁場測定の結果

Magnet	Max. B or B' Required Actual	Effective length Required Actual	Field quality Requirement Actual
BL1500	0.223 T	1600 mm	1%@50 mm
	0.254 T	1599.6 mm	<0.1%@50mm
BL2130	0.112/0.223 T	2230.0 mm	1%@50 mm
	0.127/0.254 T	2231.6 mm	<0.1%@50mm
BL1500	0.112 T	3600.0 mm	1%@50 mm
	0.127 T	3609.0 mm	<0.1%@50mm
QL	2.04 T/m	560.0 mm	0.5%@50mm
	2.49 T/m	538.1 mm	0.2%@50mm

1.2. LER 偏向電磁石とウィグラー電磁石

SuperKEKB の水平方向のデザインエミッタンスは、 $\varepsilon_x = 3.2/4.6$ nm (LER/HER) に設定されており、KEKB 設計値に比べてそれぞれ 1/5~1/6 に小さくする必要がある。リングのエミッタンスを小さくするために行われたアップグレードが LER の主偏向電磁石の入れ替えと LER のウィグラー区間のレイアウト変更、HER のウィグラー区間の新規導入である。リングの ε_x は、式(1)で表される。

$$\varepsilon_x = \frac{c\gamma^2}{J_x} \frac{1}{2\pi\rho_0^2} \oint_{bend} Hds \quad (1)$$

$$\left(c\gamma = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{h}{mc^2} \right)$$

ここで、 γ は Lorentz factor、 J_x は水平方向の damping partition number、 ρ_0 は主偏向電磁石の曲率半径、

$\oint_{bend} Hds$ は主偏向電磁石での積分である。円形加速器において必ずビームを 360 度回転させる必要がある。この役割を果たすのがアーク部に設置されている主偏向電磁石である。式(3)から主偏向電磁石の曲率半径を大きくすることで水平エミッタンスが小さくなることが分かる。SuperKEKB では LER のアーク部の偏向電磁石の励起磁場強度を 0.8 T から 0.2 T に下げ、有効長を 0.9 m から 4.2 m に変更し、トータルの積分磁場は変えず、曲率半径を約 4 倍に大きくした。Fig. 1.10 は SuperKEKB 用に新規に製作された LER 用偏向電磁石である。

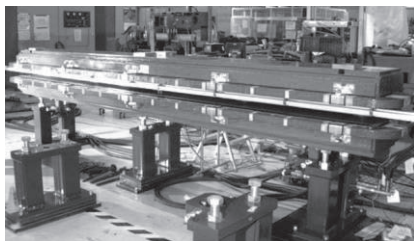


Fig. 1.10 新規に製作された LER 用主偏向電磁石

さらにエミッタンスを小さくするために LER のウィグラー区間のレイアウト変更、HER へのウィグラー区間の新規も行われた。ウィグラー区間はリングのエミッタンスを小さくするうえで重要な区間である。Fig. 1.11 は KEKB で使用されていた double pole ウィグラー電磁石の写真と OPERA-3D で計算された各ポールの磁場強度である。このように非常に短い距離に反対の極性を持った垂直磁場を発生させ、ビームを左右に揺らすことで意図的に放射光を発生させる。ビームは複数のウィグラー電磁石を通過する間に連続的に揺さぶられる。このときの放射減衰の効果と空洞による加速を利用してビームのエミッタンスを下げる事ができる。

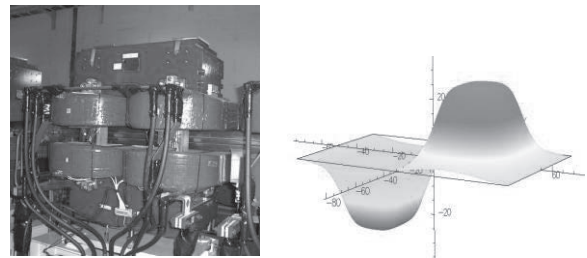


Fig.1.11 左: double pole ウィグラー電磁石、右: 磁場シミュレーション

KEKB では、大徳直線部および日光直線部で double pole ウィグラー電磁石のみで構成されていた。しかし、SuperKEKB では KEKB に比べより低いエミッタンスが要求されるため、LER リングでは、より磁石長の短い single pole および half pole ウィグラー電磁石が新規に製作し、既存の double pole ウィグラー電磁石の間に挟み込んで SuperKEKB ウィグラーシステムに改造した。このような改造が大徳直線部および日光直線部で行われた。Fig. 1.12 は新規に設計されたウィグラー電磁石と 1 セルあたりの磁石配置図である。ビームの蛇行周期を短くすることでエミッタンスのより一層の低減が可能となる。

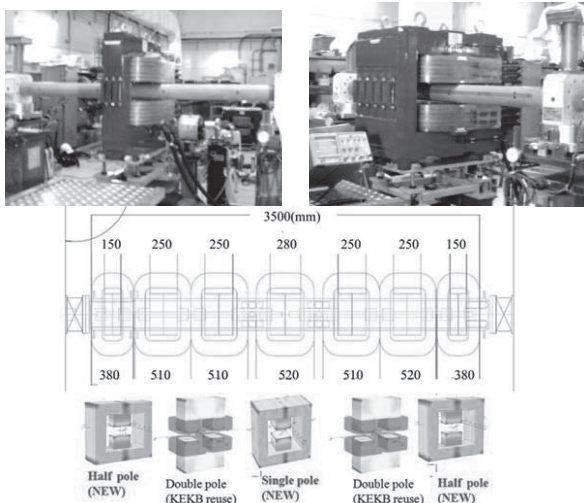


Fig. 1.12 half pole 磁石(左上)と single pole 磁石(右上)、LER ウィグラー区間のレイアウト(下)

HER ではデザインビームエネルギーが 8 MeV から 7 MeV に変更されたため、要求されたエミッタンスに近い値になっているが、さらにエミッタンスを小さくするために KEKB で使用していた double pole ウィグラー電磁石を再利用して大徳直線部に新しくウィグラー区間を建設した。

磁石の磁場強度と均一性はロングフリップフロップコイルとハーモニックコイルを使って評価した。また、磁石の有効長はマッピング用の小さなフリップフロップコイルを用いて評価した。

Fig. 1.13 はロングフリップフロップコイルで測定した LER 偏向電磁石の積分磁場の磁石横方向の分布である。磁石の中心から ± 50 mm の範囲での積分磁場のばらつきは 0.05 % と非常に小さく、磁場均一な領域が十分に確保されている。

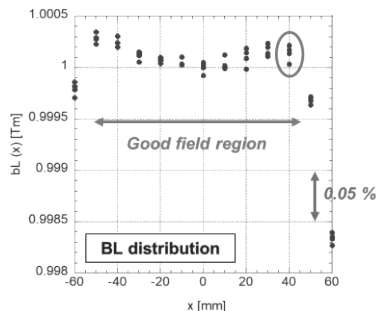


Fig. 1.13 LER 偏向電磁石の積分磁場(横方向)

リング全周に配置された 108 台の主偏向電磁石は、1MW 級の電源 1 台で励磁される。また、ウィグラー電磁石も数台まとめて 1 台の電源で励磁される。そのため、同じ電流を印加した際の各磁石の磁場強度のばらつきは小さくなくてはならない。Fig. 1.14 は LER 偏向電磁石の積分磁場強度の分布を表している。磁場強度は平均値で規格化している。108 台の磁場強度分布の標準偏差は 2.1×10^{-4} と非常に低い値であった。

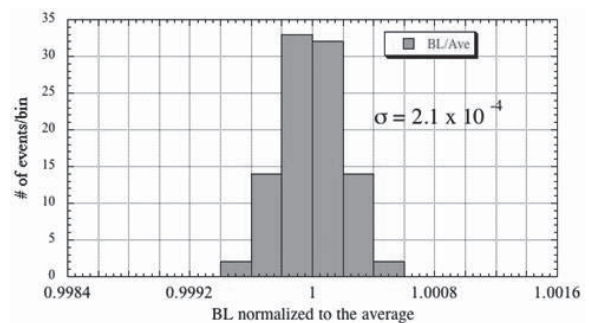


Fig. 1.14 LER 偏向電磁石の積分磁場のばらつき

Fig. 1.15 はウィグラー電磁石に関する磁場強度のばらつきである。ウィグラー電磁石は $\sim 1 \times 10^{-3}$ と偏向電磁石に比べて大きな値となった。これは、ウィグラー電磁石の磁極長が短いためであると考えられる。しかし、ビーム運転のときのオプティクス補正によりこのエラーは補正されるため、大きな問題にはならない。

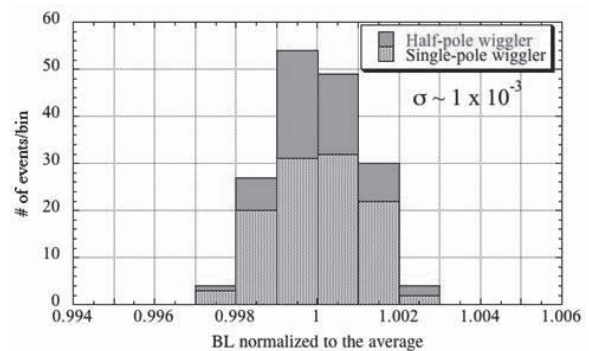


Fig. 1.15 ウィグラー電磁石の磁場強度のばらつき

1.3. 回転六極電磁石

LER 偏向電磁石の入れ替えやウィグラー区間のレイアウト変更により、低エミッタンスのラティスの設計が粛々と進められる中、次に重要になるのが、衝突点におけるビームの調整である。いくつかあるビーム衝突調整パラメータのなかで色収差の補正がルミノシティ向上に大きく寄与することが、KEKB 運転中に確認されている。この調整に大きく貢献したのが skew 六極電磁石である。SuperKEKB では、skew 六極成分と normal 六極成分の比率を磁石の回転角度によってコントロールすることができる回転六極電磁石が導入された(Fig. 1.16)^[8]。KEKB で使用されていた 24 台の六極電磁石を、新規に製作した回転架台に取り付け、衝突点を挟んで約 400 m の範囲の LER ビームラインに設置されている。回転精度は 0.1 mrad、回転レンジは -30 度から+30 度 (-523.58 mrad から+523.58 mrad) である。

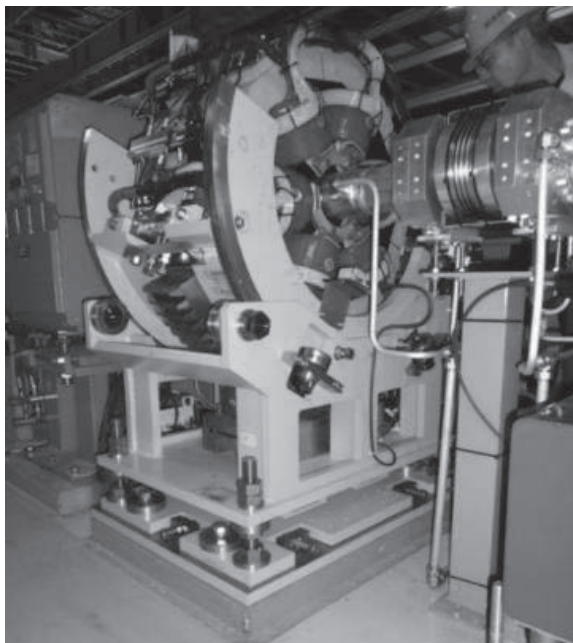


Fig. 1.16 LER ビームラインに設置された回転六極電磁石

加速器分野において、磁石を回転させる機構を持ったシステムはいくつか報告されている。粒子線

治療用のガントリーや小さな永久磁石を回転させるシステムはその一つである。しかし、今回のように重さが 700 kg にもおよぶ電磁石を±30 度という大きな回転角度で、しかも 0.1 mrad 精度で遠隔制御できるシステムの開発は世界でも初めての試みであった。ここでは、その構造と製作過程における重要な点において説明する。

回転六極電磁石の製作において考慮すべき事項の 1 つが磁石に取り付けられるアクセサリーの大きさや取り付け位置である。磁石の回転を妨げないように、また回転した際に磁石本体はもちろん、電源ケーブルや冷却水配管などが隣接する電磁石やそのほかの加速器要素と干渉しないよう構造が見直された。Fig. 1.17 は改造前後の六極電磁石の断面図である。水平方向に出っ張っていた様々なアクセサリーを出来るだけコンパクトに納めるよう改造されていることが分かる。

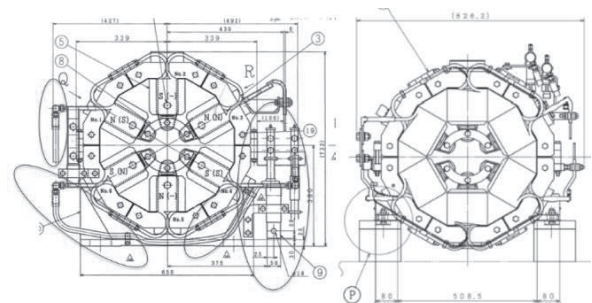


Fig. 1.17 改造前後の六極磁石の断面形状(左：改造前、右：改造後)

次に回転六極電磁石の回転機構について説明する。磁石の回転架台は大きく分けて 2 個のパーツから構成されている。1 つは磁石が固定され磁石と共に回転する回転テーブル、もう 1 つはその回転テーブルを駆動させるための駆動架台である。Fig. 1.18 にこれらの詳細な図面を示す。回転テーブルの下方には半径 450 mm ヘリカルギアが取り付けられている。一方、駆動架台上部にはストレートギアが取り付けられており、このギアを回転させることで、ヘリカルギアに動力をつた

え磁石を回転させる。700 kg もの重量物をなめらかに精度よく動かすために、十分なパワーを持ったモーターとギアの選定を行った。また、ギア的位置や回転機構への取り付けを工夫し、全体がよりコンパクトになるよう設計されている。2つのギアは一つの金属ブロックから削り出したもので、高精度の加工が施されており、磁石の高い回転精度さらに回転したときの中心軸のズレを小さく抑えることに貢献している。

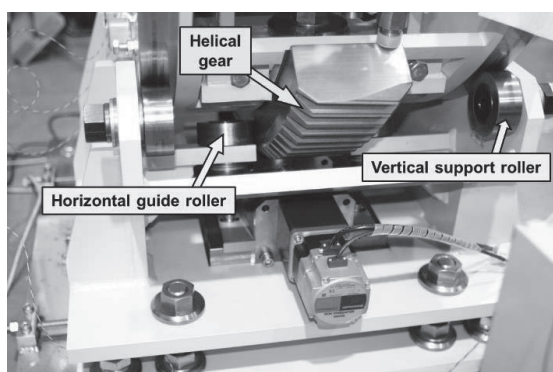


Fig. 1.18 ギアを使った回転機構

回転架台に六極電磁石を組み付ける際、磁石を回転させたときに磁石の中心のズレが出来るだけ小さくなるように回転中心と磁石の中心を合わせる作業が必要となる。磁石の中心にはビームチェンバーを据え付けるための空間が開いているため、回転軸を持っていない。そこで磁石の中心位置を視覚的に表現するため、各磁極の合わせ

面に径 0.1 mm の BeCu ワイヤを 3 本張りこの交点を磁石の機械的中心とした(Fig. 1.19 (中))。磁石を回転させた前後でこの交点のずれをセオドライト(E2:Laica)で測量し(Fig. 1.19 (左))、回転前後で出来るだけずれないように調節ネジで磁石の位置を調整した。具体的な手順を以下に示す。

- 1) レベリングブロックの上に磁石を設置し、ベースプレートに乗せた高精度の傾斜計を参考にしながら磁石のレベルを調整する。
- 2) 磁石の両側のクロスヘアに沿ったラインを光軸としてセオドライトの位置と角度を調整する。
- 3) 磁石を+30度回転させ、2カ所それぞれのクロスヘアの位置を測量する。
- 4) 磁石を-30度回転させ、2カ所それぞれのクロスヘアの位置を測量する。
- 5) 下の式を使い回転中心と磁石の中心のずれを計算し、調節ネジを使って磁石位置を調整する。

$$dX = (Y_+ + Y_-)/2\sin(K)$$

$$dY = -(X_+ + X_-)/2\sin(K)$$

K は回転角、X、Y はそれぞれ水平方向と垂直方向の座標である。1)~5)の作業を繰り返し行い、最終的に磁石を±30度回転させたときにクロスヘアの位置のずれが 0.1 mm 以内に収まるよう調整を行った(Fig. 1.19 (右))。

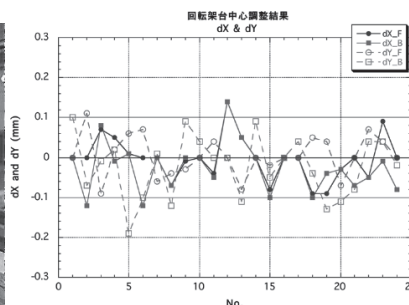
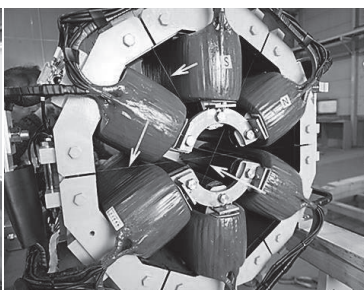


Fig.1.18 左：回転中心の調整の様子、中：磁石に張ったワイヤ、右：回転中心からの電磁石中心のズレ

磁石には回転角度をモニターするための傾斜計が設置してあるが、 0.1 mrad の精度で磁石の回転を制御するためには、この傾斜計の校正も重要となる。校正の手順を以下に示す。

アライメントに使用される傾斜計は非常に高精度で角度を測定できるが、測定レンジは狭い。そこで 30 度近い大角度を正確に測るために sine-bar tool と呼ばれるジグを用いた。水平方向のプレートの長ささとプレートを支えるバーの長さを精度よく製作・測定することにより大きな角度を精度よく測定できる。ジグのプレートの上に高精度の傾斜計をおき、小さな角度を測定しこれらの値を足し合わせることで正確な磁石の傾きを知ることができる。角度を 5 度ずつ変えながら、そのときの角度と傾斜計の電圧から校正を行うことで精度の高い角度制御を可能にした。Fig. 1.20 は sine-bar tool を使った角度測定の様子である。このようにして組みあがった磁石を加速器トンネルに搬入しビームラインへ据え付ける作業をおこなった。通常のエレクトロニクスは磁石と架台を別々に搬入しビームラインに据え付けた後、磁石のアラ

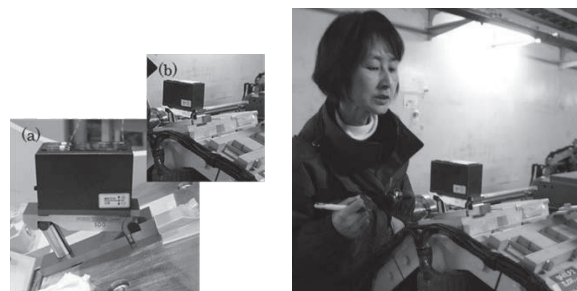
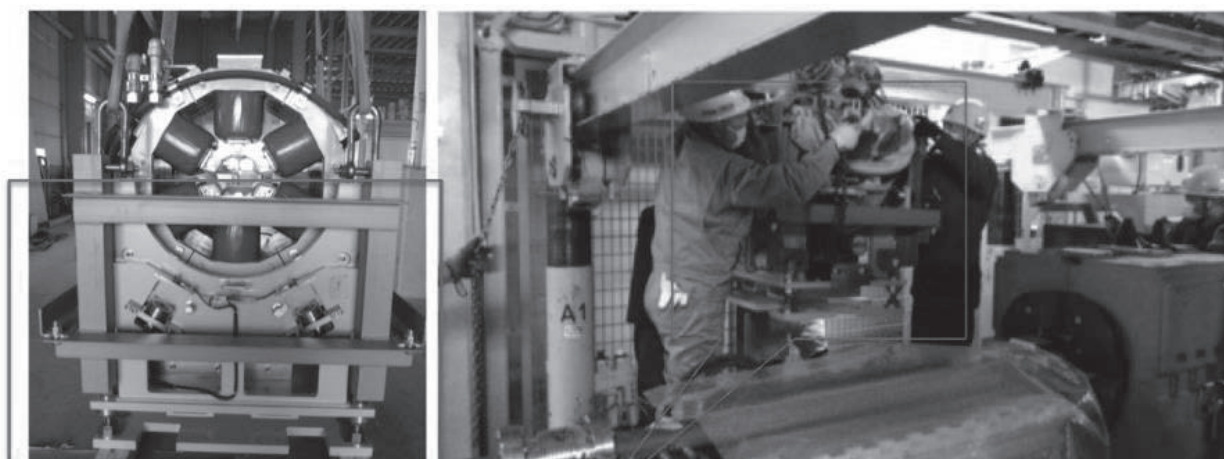


Fig. 1.20 sine-bar tool を使った角度測定の様子 (左 : sine-bar tool、右 : 測定の様子)

イメントを行うのが、回転六極に関してはすでに回転中心と磁石中心を合わせてあるため、またビームラインに据え付けた後にこのような回転軸の調整ができないため、磁石と架台の位置関係が変わらないように Fig. 1.21 のような磁石と架台の両方を吊り下げる籠のような特別な治具を製作し作業を行った。特に磁石と回転機構の取り付け部分が離れないように十分注意しながらビームラインへの設置を行った。



調整後は下半分は分離してはいけない！ 一体物として据付ける。

Fig. 1.21 吊り籠(左)とビームラインへの設置の様子(右)

トンネル内に据え付けられた後の電磁石には電流を供給する電力ケーブルや冷却水配管が接続される。通常の電磁石は位置が固定されているため、使用される電力ケーブルはどちらかというところ剛体に近い感じのものである。いかに滑らかな回転を妨げないような接続が出来るかを考え、素線が細くて編み込み方も特別な電線とフレキシブルホースを採用した。通常の電力ケーブルと冷却水配管を中継盤で受けて力が直接回転機構にかからないようにして、中継盤と回転機構の間はこれらの柔らかい特殊ケーブルとホースを使用して極力回転機構に力が加わらないように繋いだ (Fig. 1.22)。

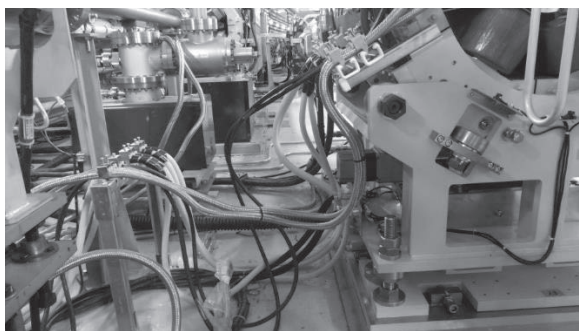


Fig. 1.22 電力ケーブルと冷却水配管

2016年2月からスタートした Phase-1 コミッショニングにおいて磁石中心のミスアライメントがないかの確認と回転の動作確認を行った。まずは 10 台の磁石についてビームがない状態でリモート制御により 0 度から -30 度まで回転させ、正確に目標値まで動くことを確認した。次に Beam Based Alignment (BBA) という方法を用いて 40 mA の低電流で磁石の中心のズレの確認を行った。ビームを蓄積した状態で磁石を -30 度から 0 度まで回転させ、-30 度と 0 度の時のビーム軌道の差を測定した。磁石の回転前後で x および y 方向とも軌道の大きな変化は見られなかった。Fig. 1.23 は -30 度と 0 度のときの磁石中心の差を示している。ほとんどの磁石でその差は 0.5 mm 以内で平均はほぼ 0 mm、シグマは 0.14 mm であった。

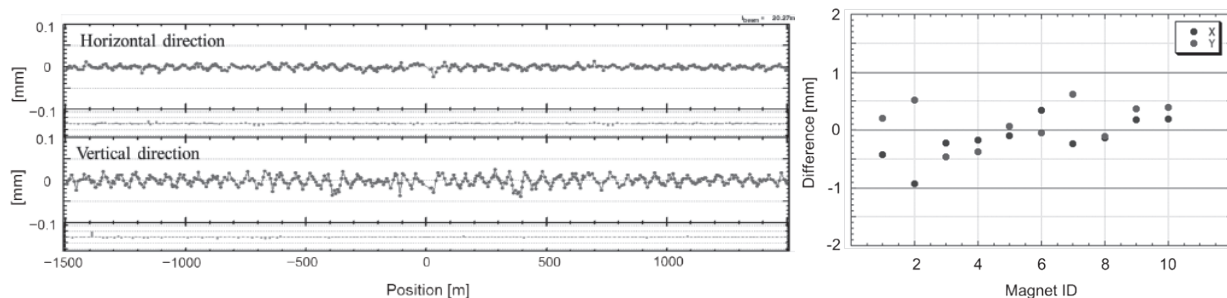


Fig. 1.23 回転前後の軌道の差(左)と各回転六極電磁石の中心のズレ(右)

2. SuperKEKB アライメント

2.1. SuperKEKB トンネル

SuperKEKB 建設では加速器トンネルをはじめ、電磁石等の加速器コンポーネントなるべく多く再利用して建設コストの削減及び建設期間の短縮を図った。SuperKEKB トンネルは、1980年代のトリスタン加速器の建設時に造られたものであり、今回の SuperKEKB で、その前身である KEKB 加速器を入れて3世代の加速器を経験することになる。Fig. 2.1 は SuperKEKB 主リング全体を上から見たものである。SuperKEKB 主リングは周長約 3km で、トンネル床は地表から約 11m の地下に位置している。主リングは北側から時計回りに筑波、大穂、富士、日光と呼ばれる4つの実験棟とその両側に約 100m 伸びる直線部、各直掩部をつなぐアーク部から成っている。このうちの筑波実験棟に電子・陽電子の両ビームが衝突する衝突点があり BELLE II 検出器が設置され様々な物理現象を捉える。

それぞれの実験棟については杭打ち基礎が施されているが、アーク部については杭打ちなしで地中にフリーの状態で置かれている。またトンネルの熱膨張・収縮を吸収するため約 60~70m おきにエキスパンションジョイント(Fig. 2.1にある切れ目)が設けられている。

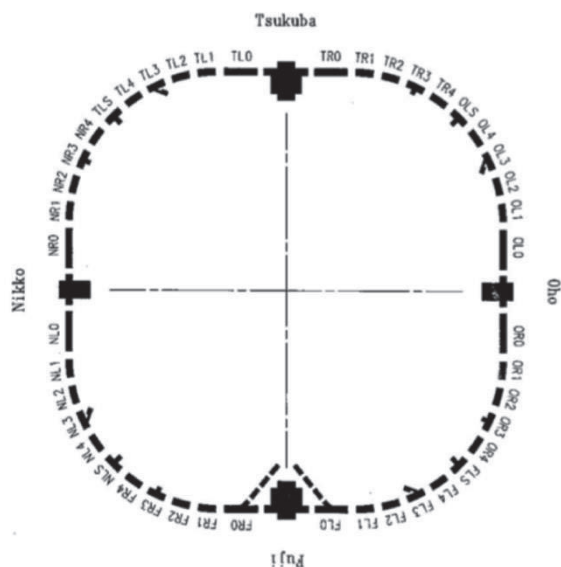


Fig. 2.1 : KEKB トンネル

SuperKEKB 建設の第一歩として 2010 年の秋に KEKB 主リングの解体作業を開始した。これと同時に SuperKEKB アライメント用に測量基準点を測量し精密測量網を完成させる作業、すなわち一周 3km に及ぶ主リングにある数百もの測量基準点座標と KEKB 運転によって確立された加速器座標系を 100 μm 以下の精度で合わせる作業を進めていた。ところが、このタイミングで東日本大震災が発生し、完成したばかりの精密測量網は破壊されてしまったのである。余震が続く中、限られた作業時間の中で簡易的な測量を行なったところ、エキスパンションジョイントのところでは大きな変化が見られ、特に実験室とアーク部の境目で段差ができてしまったことを確認した。Fig. 2.2 はミリ単位で開いてしまったエキスパンションジョイントの一例である。



Fig. 2.2 : ミリ単位で開いたエキスパンションジョイント。

2.2. Strategy

東日本大震災によりトリスタン加速器、KEKB 加速器と引き継いだ精密測量網が崩れ、基準点座標の情報を失ってしまった。そこで、SuperKEKB では

- 1) 局所的な測量基準点を用いて電磁石をアラインメントする、
- 2) 通し測量を行い、その結果をもとにまた電磁石をアラインメントする

という作業を繰り返して各電磁石の最確値を求め、全周の電磁石が滑らかにつながるように修正をかける作戦に変更した。具体的にはトンネル壁や床の測量基準点と電磁石を同時にレーザートラッカーで測量し、Fig.2.3にあるような測量網を組んで行く。一回の測定では図3の枠で示されているように左右~16m の範囲にある測量基準点を測量する。枠内全ての測量が終了したら、レーザートラッカーを~8m 離れている隣の測量ポイントに移動する。このようなレーザートラッカー設置ポイントは主リング全周に400箇所近くある。このように~8m ずつレーザートラッカーを移動し、測量網をオーバーラップするように衝突点を挟んで主リング~3km を回る。~400セットの枠内データを重ね合わせる解析をすることから、系統誤差には特に注意を測った。実際には2ないし3グループで測量を行ったので、それぞれのグループが使うレーザートラッカー間の系統誤差がないことを確認するための校正作業も行っている (Fig. 2.4)。測量網計算の際には観測点を信頼した固定点を持たない計算手法(フリーネット)で設計値に対して最小二乗法により最確値を求めた。この方法で求めた新点(すなわちアラインメントすべき電磁石の目標値)については~0.02mm の精度で求めることができた。

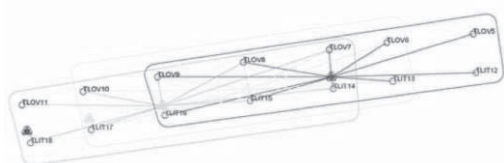


Fig. 2.3 : レーザートラッカー測量網例。



Fig. 2.4 : レーザートラッカー校正の様子

今回の SuperKEKB 主リング測量では主に FARO 社製のレーザートラッカーION を使用し、建設の後半では後継機でもあるより軽量な VANTAGE を投入している。一点の測量について 1kHz のサンプリングで 5000 点測量し平均値を真の値、として使用した。また、5000 点のバラツキが大きい場合には再測定を行うようにした。バラツキが大きい原因の一つに空気の揺らぎがある。この場合にはトンネル内空調を測定中だけ停止する、人の出入りを制限する等の対策をとった。また全周測量期間は長期に及ぶため、この期間の温度が大きく変化しないよう施設側にも協力して頂いた。

2.3. 測量(レーザートラッカー)

SuperKEKB 主リングには 2000 台以上の電磁石があり、それぞれ2ないし3個の測量用基準面を持っている。基準面は精度よく加工された~10cm 四方の面(例: 平行度、平面度共に ± 0.01 mm 以内)で、その面を水平面からのズレを水準器で測量することができる。またこの基準面中央部にはレーザートラッカー用のターゲット(球面ターゲット)用のホルダーを差し込むために孔があげられている。この孔はガタがないように精度よく、例えば $\phi 24.96$ H7 という精度で加工されているので磁極中心位置を ± 0.05 mm 以上の精度で決定することができる。電磁石の基準点とトンネル内の壁や床にある測量基準点を入れるとレ

ーザートラッカーで測量すべき点数は優に 5000 点を超える。

2.3.1 測量結果

電磁石アラインメント後に初めて行なった主リング全周測量の測量網計算結果を Fig. 2.5 に示す。この図にある測量網構築には DESY の PETRA 加速器で実績のある PANDA (Program for the Adjustment of Networks and Deformation) を用いた。最近では測量網構築用のソフトウェアは多種あり、加速器業界で人気のあるソフトウェアは SA (SpatialAnalyzer:New Rivwe Kinematics 社製) であろう。今回の SuperKEKB での測量にこのソフトウェアを使わなかった最大の理由は、大型加速器での実績がなかったことと、データの重ね合わせの際の累積誤差の評価がブラックボックスであったことである。SuperKEKB 測量網の大きさが周長 2.3km の PETRA に近かったこと、そして加速器に携わっているアラインメントチームがソフトウェアの開発に参加していること、中身がブラックボックスでないこと、等の理由で PANDA を選定した。

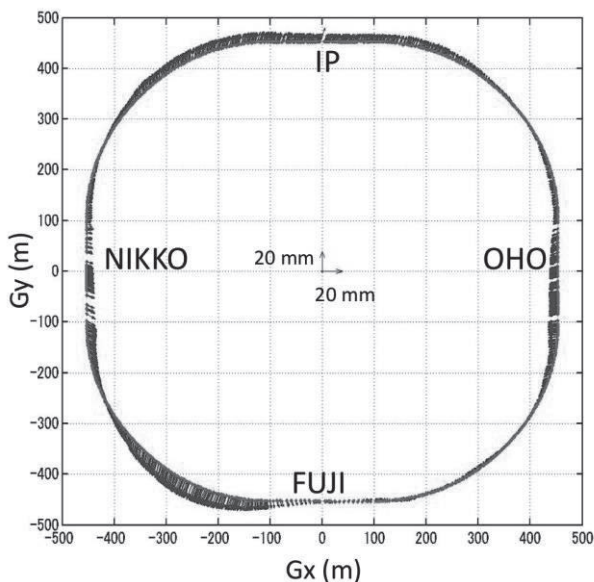


Fig. 2.5 : 測量網計算結果

図 5 より、SuperKEKB リングが大きくゆがんでいることがわかる。例えば、日光と富士の間のアーチ部では実際の電磁石はリング外側に膨れる形で置かれている。このような大きなゆがりは

KEKB 開始時のアラインメントをそのまま引き継いでいる。実際にこのような大きなゆがりは加速器の運転上、それほど問題にはならない。SuperKEKB では、もちろん、全数の電磁石を設計値どおりに設置することも可能ではあったが、その場合 KEBK から現場に残り SuperKEKB でも再利用される電磁石以外の加速器コンポーネントの再アラインメント作業も同時に行わなければならない。加速器光学グループとの相談の上リングの大きなゆがりは修正しないことにした。

2.3.2 目標値の設定と修正アラインメント対象電磁石の選定方法

目標とすべき座標 (関数) については、リング一周してスムーズに閉じる周期的な関数であることが条件であることから n 次のフーリエ関数を選んだ。次数については、修正すべき電磁石数との関係から 60 次を選んだ。電磁石の並びの周期をベータatron振動よりも大きなゆがりにしたかったが例えば 30 次を選ぶと修正する電磁石数が多くなることから、これも光学グループとの相談で 60 次に落ち着いた。

Table 2.1 に今回 (SuperKEKB Phase1) の電磁石アラインメント許容値をまとめた。ビーム進行方向については特に偏向電磁石とウィグラー電磁石については緩めに設定されている。これについては Phase1,2 以降必要に応じて再アラインメントすることは可能である。

Table 2.1 アラインメント許容値

Magnet type	dt (mm)	ds (mm)
偏向電磁石	0.4	0.8
ウィグラー電磁石		
四極電磁石	0.2	0.4
六極電磁石		

Fig. 2.6 と 2.7 に各電磁石基準面の目標値からのズレを LER と HER についてそれぞれプロットした。3次元座標をビーム進行方向のズレ (ds) とビーム直角方向のずれ (dt) に分けてある。Table 1 の許容値を満たすために、LER/HER 両リ

ング合わせて約400台の電磁石の修正アライメントが必要となった。工程期間からくる制約からこの作業を2つのグループで行なっている。また、修正アライメント作業そのものをチェックするための測量チェックグループを編成し、各アライメントグループの後を追う形でチェック及び再修正を行なって工程内に必要作業が終了するようにした。

Fig. 2.8 は HER の修正アライメント前後の電磁石位置ズレをプロットしたものである。アライメントチェックグループにより下の図にあるよう大きく位置ズレが見つかった電磁石もあり、これについてはすぐさま再修正を行なっている。

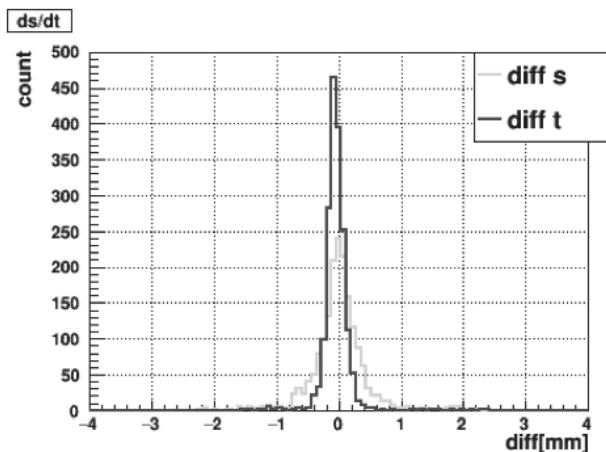


Fig. 2.6 : LER 電磁石の目標値からのズレ。

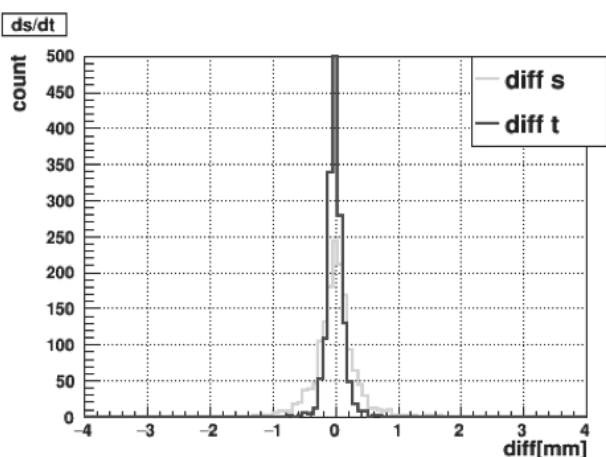


Fig. 2.7 : HER 電磁石の目標値からのズレ。

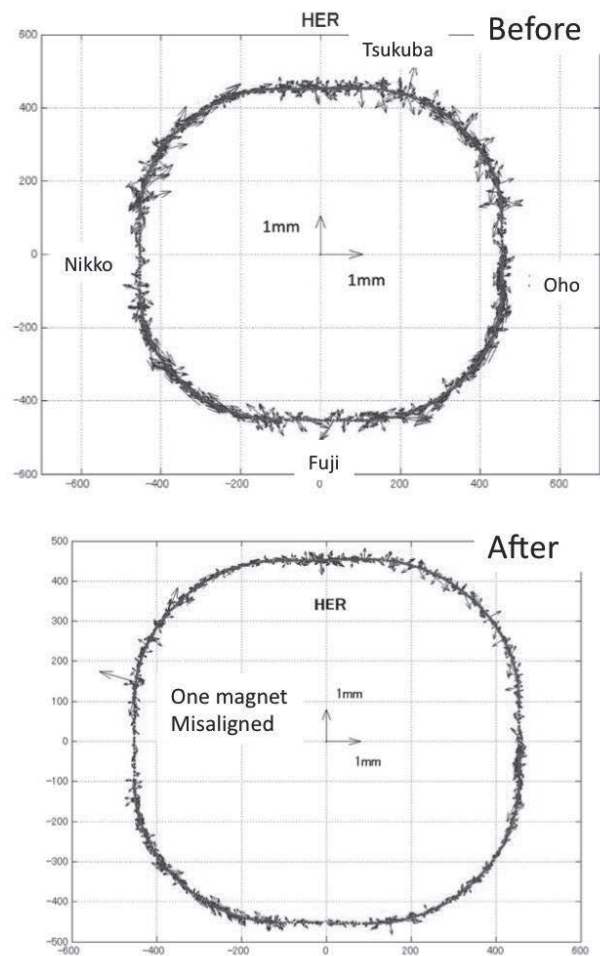


Fig. 2.8 : 修正アライメント前後の電磁石位置のずれ(HER を例にして)。

2.4. 周長の評価

このようにして、主リング電磁石がスムーズな周期関数に従って設置されているかどうかの判断をし、凸凹している箇所については修正アライメントを行った。次にチェックすべき重要なポイントは周長である。周長の絶対値を求めることは容易なことではない。同じ測量を何百回と繰り返して一周データとするので、測定誤差が例えば小さいものであっても系統的に載ってくる場合にはその累積誤差はそれなりに大きくなる。測量網を作ることで、例えば図8にあるように、とりあえず『閉じたリング状』にすることはできてもそのリングが設計値に対して少し大きめになっているのか、小さめになっているのか、が周長の絶

対値を知る上で重要である。これを調べるために、ある四極電磁石抽出しその電磁石間の距離を直接測量したものと、測量網計算から求めた四極電磁石の座標から求めた電磁石間の距離の比較を行った。Fig 2.9 は、抽出した四極電磁石同士の距離と設計値との差を衝突点から反時計回りに積算し、衝突点からの距離に対してプロットしたものである。もし設計値通りであれば、差の積算量はゼロである。直接距離を測った場合（丸マーク）と PANDA による測量網計算結果（四角マーク）で良い一致が確認された。また、実際には、Fig. 2.5 でいうと左側の半円で周長が伸び気味になっている傾向があることも確認され、周長としては設計値に対して 17mm 程度長めになっているという結果が得られた。因みに、KEKB でも運転終了間際には周長は設計値よりも~10mm 伸びていることがわかっている。また、東日本大震災後に先に述べたようにエキスパンションジョイントが開いたことにより、KEKB トンネル周長が一時的に 30mm 程度も伸びたことが報告されている。

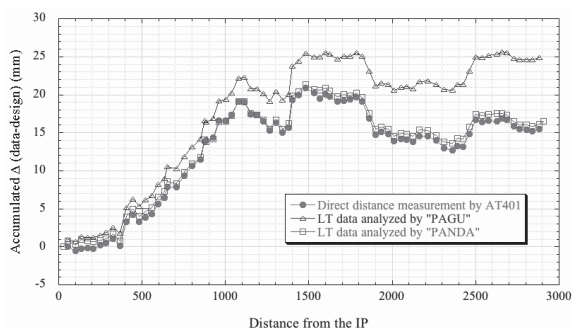


Fig.2.9 : 周長の評価

2.5. 運転

これらの測量結果については随時光学設計グループにフィードバックされ意見交換をすることにより限られた時間と予算内で目標を達成するための“good enough”アラインメントであることを確認した。もちろん、時間とお金をかければアラインメント誤差を更に小さくすることも可能ではあったが、SuperKEKB 建設にあたって

は、“good enough”を目標とし、必要に応じて修正などの作業を行うという作戦をとった。

2016 年 2 月から始まった SuperKEKB 運転 (Phase 1) では我々の出した周長予測値を初期値として加速器の調整を行った。結果周長予測は 1mm 程度で合っており、また LER・HER 両リングの周長差は 0.2mm 程度で互いに一致していた。2018 年 3 月から主リング入射が始まった Phase 2 では、初めて衝突実験を行ったが、この際にも HER ビームを垂直方向に 0.03mm 程度 LER 側に寄せることで衝突信号を得ることが出来た。KEKB 運転終了後の東日本大震災で絶対的な測量網は崩れてしまったが、新しい精密測量網を構築し系統誤差の累積に注意することで SuperKEKB 主リングの立ち上げには“good enough”なアラインメントをすることが出来た。

本稿ではアライメントやデータ処理等について詳細は省いた。関心のある方は IWAA

(International Workshop on Accelerator Alignment)サイト等を参照してください。

3. 電磁石冷却水システム

3.1. 冷却水システム

電磁石システムの中で重要な要素の一つが冷却システムである。冷却水システムに要求される性能は~1750 台の水冷式電磁石全てに (1) 必要流量を安定に供給すること、(2) 冷却水の温度を一定に保つこと、である。

Table 1.1 で示したように SuperKEKB MR 内で使用される電磁石の多くは数百アンペア、磁石によっては 1 kA を超える電流が印加され、励磁が行われる。そのため、コイルから発生するジュール熱は数 kW~十数 kW と非常に大きい。Fig. 3.1 は 4 極電磁石のコイルの断面写真である。加速器に使用される電磁石の多くは導体内に空いた孔に冷却水を流し冷却する直接冷却と呼ばれる方法がとられている。一方、補正磁石用コイルや補助巻線などの印加電流の小さいコイルは自然放熱を利用した空冷が採用されていることが多い。トンネル内の各電磁石には、地上部に設置された冷却水循環ポンプを用いて純水が供給される^[9]。

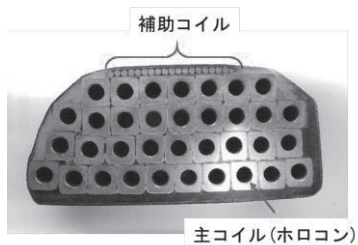


Fig. 3.1 電磁石に使われるホローコンダクター

MR 内に設置されている水冷式電磁石は全部で 1750 台にもおよぶため、これら全部の電磁石を十分に冷却するためには、約 20000 L/min の膨大な冷却能力が必要となる。KEKB で使用していた冷却水システムは、その前身であるトリスタン時代に建設されたシステムを再利用したものである。KEKB MR に設置された電磁石はトリスタン時に比べ約 2 倍に増加したため、冷却水容量としては余裕のない状態で適時調整して運転を行っていた。前章で述べたように SuperKEKB では偏向電磁石やヴィグラール電磁石など約 400 台の水冷

式電磁石が追加されたため、KEKB の冷却システムでは現在設置されている 1750 台の水冷式電磁石の冷却は不可能であった。そのため、2013 年から 2014 年にかけて冷却水システムの増強工事が行われた。これまではリング一周 3 km を 4 分割し、筑波、大穂、富士、日光の 4 つの実験棟にそれぞれ備え付けられていた冷却水循環ポンプにより各エリア内の電磁石に冷却水を送っていたが、SuperKEKB では Fig. 3.2 に示すように 4 つの実験棟の中間に位置する場所に 3M、6M、9M、12M と呼ばれる新機械棟を建設し、各機械棟に実験棟と同等の能力を持った循環ポンプが備え付けられた。これにより、冷却能力は以前の約 2 倍となり、余裕を持って電磁石の冷却を行えるようになった。現在はリングを 8 エリアに分割し電磁石の冷却を行っている。1 エリアあたりの電磁石の数はおよそ 200 台で必要流量は 2000 ~ 3000 L/min である。また、冷却水の供給範囲は機械棟から左右 200 m と広く、巨大な冷却水循環システムとなっている。ここでは SuperKEKB の冷却水システムの簡単な仕組みとどのように維持管理しているかを説明する。

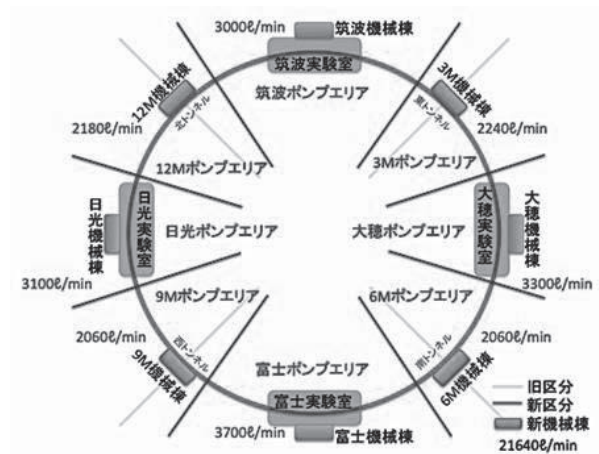


Fig 3.2: Schematic image of cooling water system.

3.2. ホローコンダクターの設計

電磁石の冷却を考えるうえでホローコンダクターの設計が重要になる。ここでは、電磁石コイルの発熱とこれに必要な冷却水流量の計算方法

を示し、それをもとにしたホローコンダクターの設計方法について説明する。一般的に電磁石コイルには、無酸素銅が使用される。銅の電気抵抗率を ρ 、1ターン当たりのコイルの平均長を L_c 、コイルの導体面積を S とすると N ターンのコイルの抵抗は、

$$R = \frac{\rho N L_c}{S} \quad (2)$$

で表される。ここでコイルの導体断面積は、印加電流 I 、電流密度 i により

$$S = \frac{I}{i} \quad (3)$$

と表されるため、コイルの抵抗は、

$$R = \frac{\rho i N L_c}{I} \quad (4)$$

コイルからの発熱量 W は、

$$W = RI^2 = \rho i (IN) L_c \quad (5)$$

と書くことができ、電流密度と起磁力、コイル長に比例する。通常電磁石コイルの設計では、電流密度を数 A/mm^2 から $10 A/mm^2$ 程度、流速を大きくすると銅の浸食を引き起こす恐れがあるため、原則として $2 m/sec$ 以下に設定して計算している。電流密度を小さくすると電源の観点からは印加電圧が小さくなるので有利である。しかし、その分コイルの導体断面積を大きくしなければならない。SuperKEKB は、電子・陽電子ダブルリング加速器であるため、両チェンバー間の距離に制約がある。筑波の衝突点および富士のリング交差点以外で両リングが一番接近しているところは約 $1 m$ ほどである。この間に収まるように磁石を設計する必要があるため、コイルの断面積をやたらに大きくすることは出来ない。コイル断面積を小さくするため印加電流を小さくすると同じ起磁力を得るためにはコイルのターン数を増やす必要がある。しかし、ターン数が増えるとコイル全長が長くなり圧損が大きくなる。このため、

冷却水が流れにくくなる。このようにコイルを設計する場合は、様々な要素を総合的に考慮し電流、ターン数等を決定する必要がある。

次に、この発熱を取り除くための必要冷却水流量とホローコンダクター径の計算方法を示す。

冷却水の温度上昇 dT [K]は、冷却水流量を Q [L/min]とすると

$$dT = \frac{60 \times RI^2}{4.2Q \times 10^3} \quad (6)$$

と書ける。これから、必要冷却水流量は

$$Q = \frac{60 \times 10^{-3} \times W}{4.2 \times dT} \quad (7)$$

となる。これから、必要なホローコンダクター径を求める。冷却水流量 Q は、流速 v [m/sec]と導体の孔の面積 A_F [mm^2]を使って

$$Q = \frac{60 \times v A_F}{10^3} \quad (8)$$

と書ける。実際に通水している流量はマージンも含めるためこれより多くなる。導体の孔の直径を d_F [mm]とすると、

$$d_F = \sqrt{\frac{10^3 \times Q}{15\pi v}} \quad (9)$$

と表され、必要なホロコン径が求められる。

流量と並行して考慮しなければならない事項が圧力損失である。流体が管内を通過するとき、流体の摩擦などによって圧力低下が引き起こされる。それを圧力損失と呼ぶ。ホロコン中に水を流す場合もこの圧力損失を考慮しなければならない。コイルの圧力損失 ΔP_w は、乱流領域の場合

$$\Delta P_w \left[\frac{kgf}{cm^2} \right] = 0.18 L_c v^{1.75} \frac{1}{\left(\frac{\pi}{4} \right)^{1.75} d_F^{1.25}} \quad (10)$$

と書ける。KEKB および SuperKEKB で使用されている電磁石は、どの電磁石も出来るだけ均等に冷却水

流量が確保できるようにコイル入り口と出口での圧力損失は 5 kgf/cm² に設計されている。実際のシステムでは循環ポンプにより差圧が制御されており、現在は 7 kgf/cm² 程度である。

実際に SuperKEKB で使用されている LER 偏向電磁石のコイルの場合を例にとってみる。磁石の仕様は Table 3.1 のとおりである。電流密度を 5 A/mm²、コイルの温度上昇を 30 °C 以下、圧力損失を 5 kgf/cm²、流速~2 m/s とし、この条件の下で適当な値を選ぶ。電流密度、温度上昇、コイル抵抗、発熱量、流量、流速を計算・比較し、最終的なコイル断面は 16 mm 角、ホロン孔径は 7.5 mm と決められた。

Table 3.1 LER 偏向電磁石のパラメータ

	LER_B_arc
導体面積	840 A
コイル抵抗	~10 mΩ
コイル長	88 m
ターン数	10

3.3. 冷却水システム

3.3.1 冷却水の循環

Fig. 3.3 に冷却水循環のフローチャートを示す。各機械棟には冷却水循環用のポンプが 3 台設置されている。SuperKEKB の冷却水システムはポンプ出口と入り口の水圧を一定に保つ差圧制御によって水の循環を行っており、ポンプ出口の圧力はおおよそ 10 kPa、ポンプ入り口の圧力はおおよそ 0.3 kPa である。そのため、3 台のポンプのうち 1 台は常時運転されており、もう 1 台はポンプ前後の差圧を一定に保つためにインバータ制御されている。残り 1 台は予備としてスタンバイされ月ごとに使用するポンプをサイクルさせ、3 台のポンプの劣化が均等になるように使用している。ポンプから送り出された冷却水は縦配管を通過してトンネルに送られる。トンネルまで下りてきた冷却水は細い配管で分岐され各電磁石に送られる。コイルを通過した冷却水は再び 1 つの配管に集約され地上部へと戻ってくる。このとき、母管の差圧が一定になるように、リバースリターン方式が採用されている。配管の途中には三方弁と呼ばれるバルブがついており、冷

却水の温度が 30 °C を超えると、この三方弁が動作し一部の冷却水を屋外に設置されているクーリングタワーを経由させて冷却水の温度を下げて再び主流路に戻す仕組みになっている。トンネルから戻ってきた温度により三方弁の開度を調節し、トンネル内の電磁石に供給する冷却水の温度を 30 °C になるように制御している。

また、各電磁石にはコイル入り口の配管にストレーナーが設置してある。これは、配管内に入り込んだ異物が電磁石コイル内に詰まることを防ぐためである。コイルが詰まるとコイルの冷却不足によるコイルの破損を引き起こす。最悪の場合はコイルの交換を行わなければならない。もし、このような事態になれば復旧に多くの時間がかかり、その間加速器の運転を行うことができなくなってしまう。そのため、各電磁石の冷却水入り口と各実験棟、機械棟の数カ所にストレーナーを設置している。

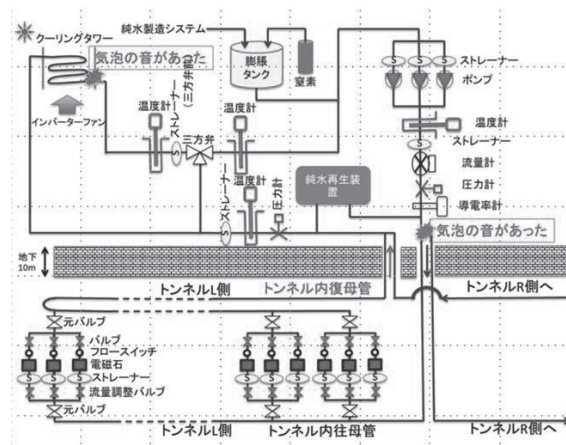


Fig. 3.3 電磁石冷却水のフローチャート

3.3.2 インターロックシステム

電磁石システムでは、ビーム運転中の電磁石の重大な故障を防ぐため、様々なインターロック(I/L)を仕掛けている。そのうち冷却水関係では、各電磁石に供給している冷却水の流量低下および電磁石コイルの温度上昇に伴って I/L が動作するようシステムされている。I/L が動作するとアラームが発報され、リング周回中のビームがアポートされる。一方、電磁石は電源からの電流供給が停止され、磁場の励起が停止される。冷却水の流量低下は、フロースイッチにより感知される。各水冷式電磁石には、出口側の冷却水配

管にダイヤフラム式のフロースイッチ(SMC:株式会社)が装備されており、設定流量の3分の2以下に低下するとI/Lが動作する。これにより、冷却不足によるコイルの温度上昇を防ぐ。万が一、フロースイッチのI/Lが動作しなかった時のために、電磁石コイルに取り付けてあるバイメタル温度スイッチが80℃(一部の磁石は60℃)を超えるとI/Lが動作する仕組みになっている。このように2重のI/Lで電磁石の異常を感知し、故障を防ぐシステムとなっている。多くの場合はフロースイッチによる冷却水低下のI/Lが動作しコイル温度が上昇する前に通電をOFFすることができる。

3.3.3 安定したシステムの運用

冷却水システムを安定に運用するためには、日々のメンテナンスも重要である。ビーム運転中、停止中に関わらず、停電等の特別な理由がない限りMRの冷却水は循環させている。この理由のひとつが不純物の除去である。Fig. 3.4は、電磁石のコイル入り口に取り付けられているストレーナーの写真である。新品のストレーナーはメッシュが透けているのに対し(左)、不純物が堆積したメッシュは黒くなっていることが分かる(右)。この物質を走査電子顕微鏡のEDXを使って分析したところ、その大半は銅と酸素であった^[10]。このことから堆積物は酸化銅IIであるとわかった。また、他の堆積物をX線回析装置で分析した結果、酸化銅IIのほかに酸化銅Iも検出された。

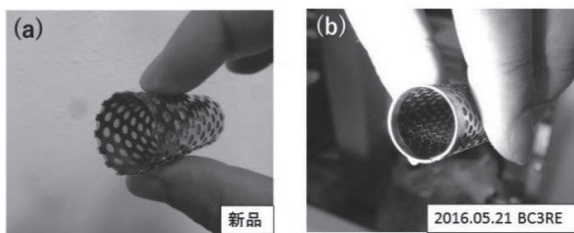


Fig. 3.4 新品のストレーナー(左)と不純物が堆積したストレーナー(右)

電磁石のコイルは無酸素銅を使用されている。特に表面処理等は施していないため、ホロコンの内表面では無酸素銅と純水が常に接している状態となる。そのため、純水に含まれる酸素と銅が反応しホロコン内表面に酸化銅が生成されたと考えられる。Fig. 3.5はあまり酸化が進んでいないホロコン内表面(左)と、

酸化が進んで黒色に変色しているホロコン内表面の写真である。このように、ホロコン内表面で銅が酸化していることがわかる。たとえ酸化したとしても表面が安定していれば問題ないが、酸化膜が表面からはがれ冷却水中に混入し、これがストレーナーに堆積していると考えられる。

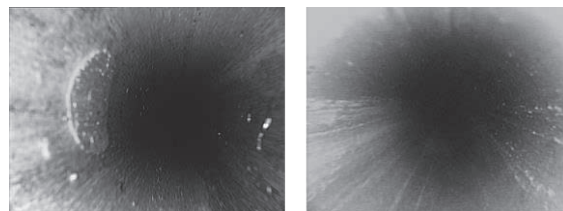


Fig. 3.5 ホロコン内表面の写真

このような冷却水中の不純物は配管中のバルブやフロースイッチの軸などに付着して流量低下を引き起こす。そのような事態になる前にストレーナーでこれらの不純物を取り除くことが重要である。より確実に不純物を取り除くため、機械棟に設置してあるストレーナーのメッシュは#100を使用している。メッシュに堆積した不純物は、定期的に除去しなければ冷却水の流量が低下してしまう。Fig. 3.6の赤で示したプロットは日光実験棟のストレーナー清掃前後の流量のトレンドグラフである。清掃前は流量が低くばたつきも見られる。しかし、清掃後は流量が回復し安定していることがわかる。そのため、加速器運転中であっても2週間に1回のメンテナンス日にメッシュの清掃を行っている。また、冷却水の温度が高いと不純物が多く堆積する傾向が見られるため、最近では加速器停止中の夏期シャットダウン中はわざと冷却水の温度を上げ循環を行っている。これ以外にも、冷却水中に混入した空気を抜くための自動エア抜き弁や空気だまりの新設などKEKB時代から冷却水システムを安定に運用するための改善が行われてきた。過去に起こったトラブルと対策に関しては加速器学会などで報告されているのでそちらを参考にして頂きたい。

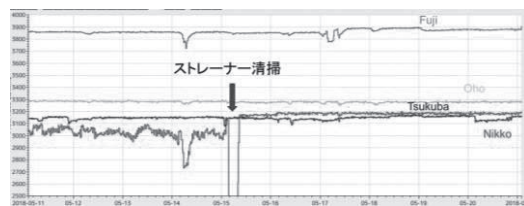


Fig. 3.6 実験棟の冷却水の流量変化

4. さいごに

今回は SuperKEKB 電磁石システムと題して、SuperKEKB における変更点を中心に話を進めてきました。しかし、電磁石システムの歴史は古く、前身の KEKB はもちろん、その前のトリスタン時代の電磁石や冷却水システムが今も使われています。この長い歴史の中でより安定なシステムを構築・運用するために様々な改善が行われてきました。SuperKEKB の電磁石システムは、諸先輩方が脈々と受け継いでこられたノウハウの上に成り立っています。特に KEKB 時代のシステムは、現在の電磁石システムのベースになっており、現システムが安定に運用されている大きな要因です。ぜひ KEKB に関する資料にも目を通して頂き、少しでも多くの方に「電磁石」およびこれに関するシステムに興味を持って頂けると幸いです。

最後に原稿を製作するにあたり、電磁石グループのメンバーの方には多くのご助言・ご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1
- [2] M. Masuzawa, “Next Generation B-factories”, IPAC, Kyoto, Japan, May 2010, pp. 4764–4768, Paper FRXBMH01.
- [3] Y. Ohnishi et al., “Accelerator Design at SuperKEKB” PTEP 2013 (2013)
- [4] C. P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy, Mar. 16-18, 2006.
- [5] Y. Ohnishi, “Lattice Design of Low Emittance and Low Beta Function at Collision Point for SuperKEKB”, IPAC 2011, San Sebastian, September 2011, THPZ007, p. 3693, 2011
- [6] M. Masuzawa et al., “Newly Fabricated Resistive Magnets of SuperKEKB Interaction Region”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, June 2016.
- [7] M. Masuzawa et al., “SuperKEKB MAIN RING MAGNET SYSTEM”, IPAC2016, Busan, Korea.
- [8] R. Sugahara et al., “Sextupole Magnets With Variable Tilting Angle for SuperKEKB”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, JUNE 2016.
- [9] Y. Ohsawa et al., “Status of The KEKB Magnet Cooling Water”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan (2007) FP65.
- [10] R. Ueki et al., “Report of magnet system for SuperKEKB”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Makuhari, Japan (2016) TUP106.