

特集2 KEKB B ファクトリーのコミッショニング

KEKB 電磁石システム

菅原 龍平*

KEKB Magnet System

Ryuhei SUGAHARA*

1. 初めに

KEKB の建設は 1994 年に機器の設計から始まった。1995 年末には 9 年間続いたトリスタスン運転を完全に停止し、トンネル内据え付け作業が 1996 年初頭から開始された。完成は 1998 年 11 月末であった。1998 年 12 月初旬には、電子ビームの運転が始まっている。以下に、KEKB の電磁石システムの概要について述べ、運転が開始されてから経験したトラブルの幾つかを紹介する。

2. KEBB 電磁石システムの概要

KEKB は、エネルギーの異なる電子 (8 GeV) と陽電子 (3.5 GeV) を衝突させる 2 リングのシンクロトロンである。電子リングを HER、陽電子リングを LER と呼んでいる。ビームは衝突するときに、垂直方向の大きさが 3 ミクロンほどに絞られる。1 リング衝突型と違って、2 リングの衝突型は大変難しいため、KEKB では当時考えることのできる精一杯の工夫がなされている。例えば、電磁石について言えば、全ての四極電磁石には BPM (ビーム位置検出器) が取り付けられており、それぞれの電磁石の中心と、ビーム軌道とのくい違いが測れるようになっている。測定されたい違いは、各電磁石に隣接した垂直および水平方向の補正偏向電磁石によって、ビーム軌道を調整することによって修正する。一方、全ての六極電磁石は遠隔操作ができるムーバーの上に設置され、電磁石の位置をビーム軌道に合わせるようになっている。また、ビームの放射減衰の時定数を電子リングと陽電子リングで揃えるために、大穂および日光の直線部の陽電子ラインに、合計 152 台のウィグラー電磁石群が据え付けられている。更に、筑波直線部で陽電子が衝

突点に入ってくる側には、陽電子ビームのクロマティシティを衝突直前に調整するために、偏向電磁石と四極電磁石からなる局所クロマティシティ調整用電磁石群が設置されている。各電磁石についても、偏向電磁石には、バックレグコイルという補正コイルが巻いてあり、各電磁石ごとに細かなビームの偏向ができるようになっている。四極および六極電磁石の各磁極にも補正コイルが巻いてあり、こちらは、この補正コイルで磁場の強さを僅かに変えることによって、ビームの磁場中心からのズレ量を測るためである (この手法は Beam Based Alignment と呼ばれている)。HER および LER の 2 リングを構成する電磁石は、23 種類、合計約 1,600 台の主電磁石 (二極、四極、六極電磁石およびウィグラー電磁石) と、合計約 1,700 台の補正偏向電磁石である。このうち HER の 119 台の偏向電磁石と 314 台の四極電磁石はトリスタンリングの電磁石の再利用である。これらの大量の電磁石の他に、筑波衝突点には、最終収束用の超伝導磁石が 2 台、最終収束の前に予備収束を行なう IR 特殊四極電磁石 (常伝導) が合計 6 台 (HER 用に 4 台、LER 用に 2 台) 配置されている。他に電磁石系を構成する大きな要素として、冷却水系および電源系がある。詳しくは、電磁石の設計・製作・磁場測定・据え付け・精密アライメント、更に冷却水系および電源系に関する報告が出されているので、そちらを参照して頂きたい^{1,2)}。

3. 建設後に経験した種々の問題

3.1 加速器主リングトンネルの地盤沈下

建設作業が始まる前年の 1995 年 10 月に、トリスタンの四極電磁石の中心位置を壁に移し、ビームレベルの基準マーカー (以降 BLM と呼ぶ) とした。この

* 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: sugahara@post.kek.jp)

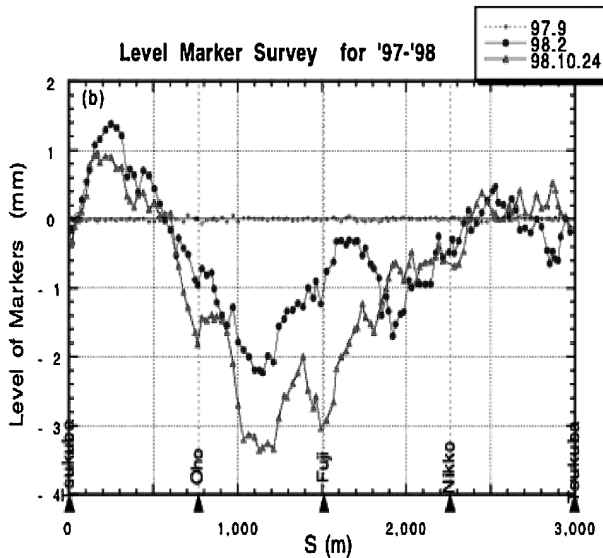


図1 1997年(全BLMを水平に調整)および1998年、1999年のBLMのレベルの測量結果

マーカーのレベルを1996年春に全周に渡って測量したところ、北の筑波衝突点に較べて、南アークが13 mmも低くなっていることが分かった。測量を1997年夏にも実施した結果、北トンネルに較べて南トンネルが年に1~2 mm沈んでいることが分かった。前記の13 mmというレベル差は、トリスタン運転の9年間に沈下が蓄積した結果であった。1997年夏の測量後、BLMを全周に渡って水平に調整し、KEKBの電磁石はこのBLMを基準にして、全周水平に並べることにした。それ以来、BLMのレベルを毎年夏に測量しているが、この南トンネルの沈下は年1~2 mmの割合で続いている。図1に全BLMを水平にした1997年と1998年および1999年の測量結果を示す。せっかく全BLMを水平に調整しても、翌年には水平が崩れていることが分かる。図2には最近までの測量結果2003年~2008年の結果を示す。2008年までの沈下量は、トンネルの傾きにして $23 \mu\text{rad}$ という微小な量である。ビーム光学グループと相談しているが、今のところこのくらいの微小変位は、局所的なものでない限り、ビーム運転にとっては支障がない、ということである。

3.2 LERリング用偏向電磁石のコイル冷却水路の目詰まり

電子ビームの運転を12月初旬に開始したが、運転に先立って両リングの電磁石を励磁したところ、12月1日に陽電子リング(LEP)の偏向電磁石の1台が、温度インターロックのために電源が落ちた。現場に行ってみると様子を見たところ、電磁石の温度がいつまで

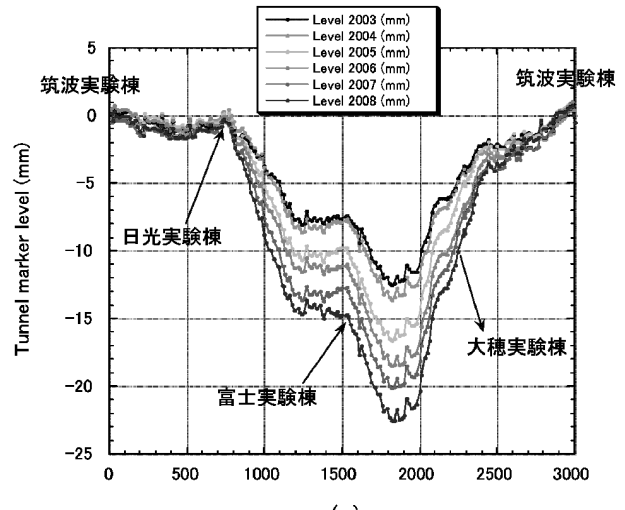


図2 2003年~2008年までのBLMのレベルの測量結果

たっても下がらない。明らかにコイル内の冷却水路の目詰まりである。すぐにメーカーを呼んで調査したところ、コイルの出口側がエポキシですっかり塞がっていた。これは、コイル製作の過程で、絶縁のためにコイル全体をエポキシのプールに漬けるのであるが、このときに入口または出口に栓をするのを忘れて、エポキシ液に漬けたものがある、ということが調査の結果分かった。これは外国の下請けで行われた作業であり、国内では考えられない不祥事であった。全数(134台+予備1台)のコイルの入口および出口をファイバースコープで調べ、少しでもエポキシが見つかれば、入口/出口のL金具を切り落とし、コイルの中奥まで観察した。この結果、全コイル数の約10%にエポキシが入っていることが分かった。12月末から1月初旬にかけての冬期シャットダウンのときに、溶剤でコイルの中にあるエポキシを洗い流す作業を行い、無事復旧できた。

また、電磁石電源は、温度インターロックが働いて落ちているが、これは温度が上がる前に冷却水の流量インターロックが働くはずであった。原因はインターロックレベルが定格流量の1/2に設定されていたためであった。これでは、今回のように二本のうち一本のコイルで冷却水が止まっても、インターロック信号は出ない。この事故の後、インターロックレベルを全て2/3に設定しなおした。

3.3 電磁石冷却水系のトラブル

運転当初から悩まされたのは、電磁石の冷却水流量低下によるインターロックの発生であった。これが発生すると、復旧までに1~2時間程度の時間を取って

しまう。運転上の大きな問題であった。電磁石冷却水は、4 実験棟（富士、日光、筑波、大穂）に隣接した機械棟に設置された水ポンプによって循環させている。トンネルから戻ってきた水は三方弁によって、一部は冷却塔へ、他は直接水ポンプへ戻って行く。冷却塔では大気によって水配管を冷やしている。この三方弁の開度によって、水の温度を調整している。トンネルの中の主配管からは枝管を延ばし、各枝管から 3 ～ 9 台の電磁石へ冷却水を補給している。電磁石コイルへの入り口側配管に流量調整弁とストレーナーが、出口側配管に流量計が取り付けられている。

さて、先に書いたように、運転当初この冷却水系の流量インターロックに悩まされた。夏の長期メンテナンス期間直後からだいたい翌年の 4 月までは、冷却水インターロックの頻度は、多くても月 2 回程度である。これが 5 月に入ると急に増える。2000 年 5 月には 26 件、6 月には 21 件発生している。電磁石冷却水系には、当初から大量の気泡が混入していることが確認されており、これがインターロック発生の原因と思われた。調査の結果、水ポンプ吐出側からトンネルに下がっていく主配管に、大量の気泡が存在することが推測された。この対策として、施設部によって、2000 年夏にポンプ吐出側縦主配管の頂上に空気溜と空気抜き弁を設けた。これが功を奏し、以来インターロック騒ぎは収まった。

ところが、2003 年 5 月に大穂地区で再び冷却水流量インターロックが出始めた。この年の夏にストレーナーのフィルターを掃除したところ、大穂地区だけに、今まで見られなかった油と銅粉末が混じった黒い粒が見られた。その後この黒い粒の汚れは、日光およ

び筑波地区でも見られるようになった。ストレーナーの清掃等で対処していたが、2006 年春に大穂の冷却水全体の流量が徐々に低下し始めた。5 月 19 日のメンテナンス日に大穂電磁石のストレーナーを点検したところ、黒色の油がベトリと付着していた。施設部と協力して調査した結果、2002 年夏および 2003 年夏に大穂においてポンプ主軸の交換作業を行っていた事が判明し、その関連性が疑われた。作業の際主軸を挿入するときに、モリブデンを主とする、カジリ防止剤を塗布するが、これを多く使い過ぎたようだ、との担当会社側の説明であった。混入した油はストレーナーで取り除く他なく、大穂地区の冷却塔配管に 150 番という細かなメッシュを入れて、これで油を徐々に濾し取っているが、今もこの問題は、尾を引いている。

4. おわりに

KEKB の建設は、当初から時間とお金とマンパワーが不足していた。これを無事完成し、予定の性能を出せたのは、世界に冠たる加速器を作る、それによって重要な物理実験をする、という情熱が、加速器・物理の職員に限らず、建設を担当された会社の方々、建設・運転を支えて頂いている KEK 管理部の方々にも理解して頂けたからだと思っています。ここに関係者の方々に深く感謝致したいと思います。

参考文献

- 1) E. Egawa et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, **A499**, pp. 24–44, 2003; KEK-PREPRINT-2001-157B, Dec 2001.
- 2) K. Kanazawa et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, **A499**, pp. 75–99, 2003; KEK-PREPRINT-2001-157F, Dec 2001.