

話 題

富士テストビームライン (FTBL) (2)—その建設—

江川 一美*

Fuji Test Beam Line (FTBL) (2)—Construction—

Kazumi EGAWA*

Abstract

The FUJI test beam line (FTBL), which was being built in the Fuji experimental hall of the KEKB accelerator, was completed in September 2007. Soon after the KEKB operation started in October, the first beam was observed to pass through the FTBL successfully. The hardware system, their installation and alignment are presented.

概 要

KEK 12 GeV 陽子シンクロトロンシャットダウンで測定器テスト用のビームラインが無くなったことから、KEKB 加速器の富士直線部にテストビームラインを建設することとなった。HER 8 GeV 電子ビームと真空ダクト内の残留ガスとの衝突で出てくる制動輻射 γ 線を大気中に取り出し、金属標的に当て電子・陽電子シャワーを作る。その電子を KEKB 加速器トンネルから富士実験室に導き測定器テストに使用しようというものである¹⁾。

このビームラインは制動輻射 γ 線を利用するので、KEKB 加速器の基本性能に悪影響を与えない。発生した γ 線は取り出し用に新規製作された真空ダクトから大気中に出て、電子リングの四極電磁石鉄芯に空けられたスリット孔を通り、タングステン標的に当り、電子・陽電子シャワーとなる。この電子を富士実験室に導くテストビームラインは、KEKB の 2 リングが設置されている狭いトンネル内に建設され、リング外側からジェットコースターのように既存リングの下を潜りリング内側に曲がりながら下降して行く。その光学設計条件から、電磁石には強い磁場が必要とされた。建設コストを押さえるため、トリスタンや KEKB の電磁石、PS ビームチャンネルで使用された電源を最大限再利用する方針を採り、新規製作は既存リングの下を潜るため『薄さ』が要求される偏向電磁石 3 台のみに止めた。電磁石はビーム軸回りに最大 40° 回転し更に前方に傾斜させ設置されるため、3 次元測量が

必須であった。その測量にはレーザートラッカーを用い、再利用電磁石にはレーザートラッカー用の基準面を新たに取付け、3 次元測量を可能にした。各電磁石の設置条件に合わせ、傾斜架台も設計、製作した。

FTBL 電磁石測量の座標基準点を設定するため KEKB 既設電磁石の測量から始め、難しい据付け作業と複雑な測量という工程を繰り返し、電磁石の設置作業を終えた。電力ケーブル配線、電磁石冷却水配管、コンクリートシールド孔空け、ビームシャッター、管理区域扉等の施設関連作業も終え、2007 年 9 月遂に完成に至った。図 1 は電磁石設置が終了した時点のテストビームライン全景である。KEKB の秋の運転が始まり加速器の立ち上げが一段落した 10 月 12 日夕刻、特別な調整も無く電磁石電源のスイッチオンのみで、ビームライン最下流で電子ビームを確認した。後に鉛ガラスカロリメーターの測定で、ほぼ設計値通りのエネルギーであることを確認した。既にテスト利用は開始されているが、来年 2 月からの本格運用に備え、更なるビームコミッションを行い、テストビームラインの調整を進める予定である。

1. FTBL の建設

3 次元モデリング

テストビームライン建設作業として先ず行った事は、新たに建設する FTBL と既存の 2 リング、8 GeV 電子リングと 3.5 GeV 陽電子リングの 3 次元位置情報を入力し、それらの 3 次元配置モデルを作成することだった。図 2 に完成した 3 次元モデルによ

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
(E-mail: kazumi.egawa@kek.jp)

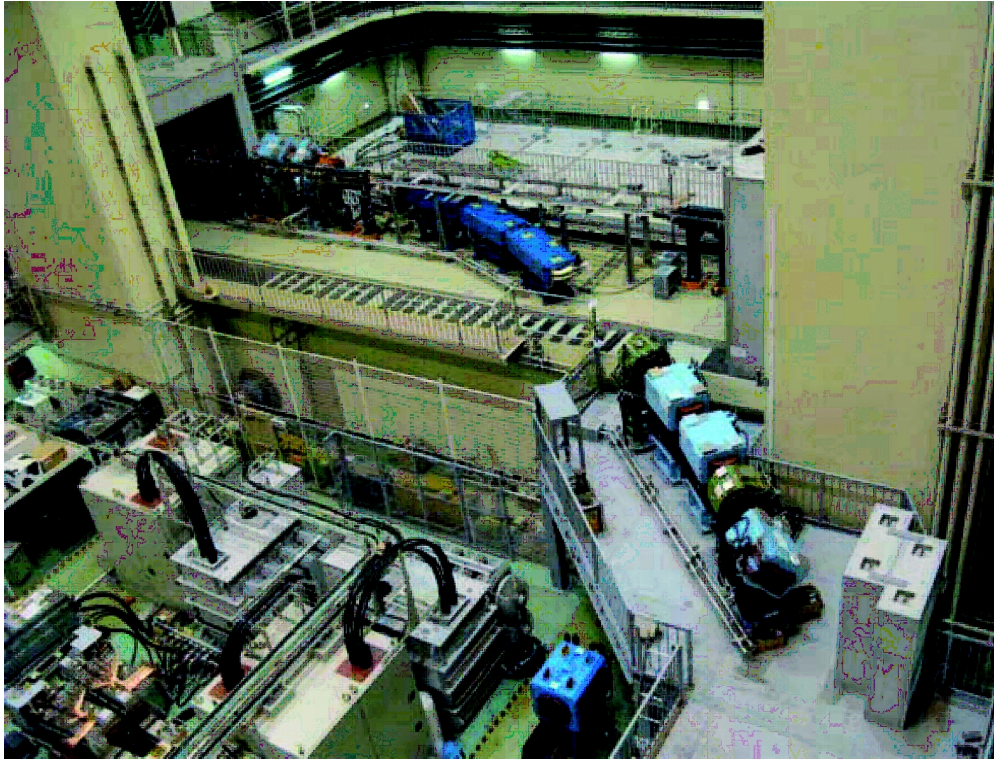


図1 富士テストビームライン全景

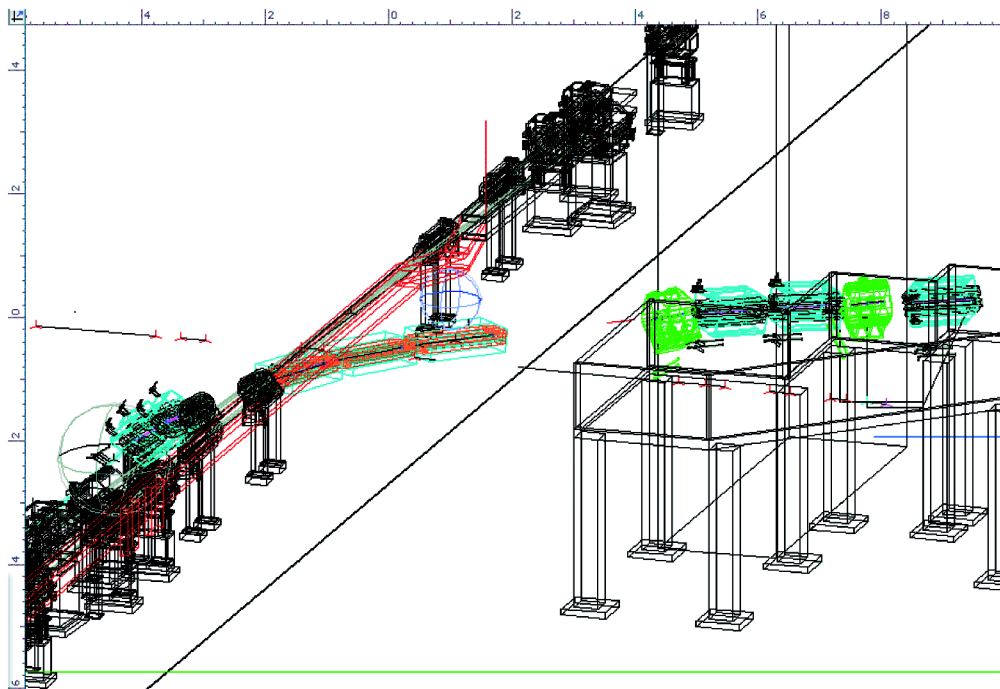
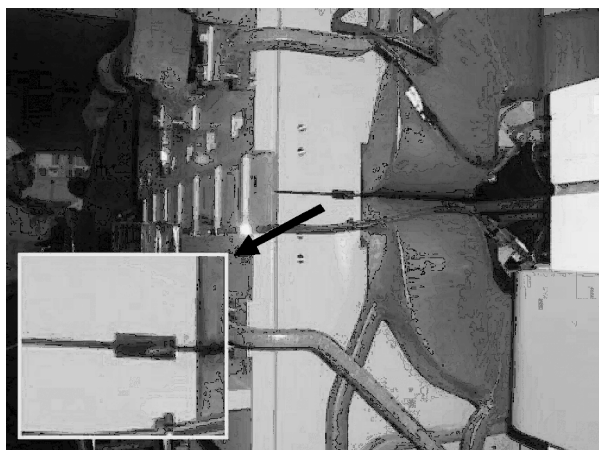


図2 FTBL と KEKB リングの3次元モデル

る鳥瞰図を示す。この3次元モデルにより各機器の配置を確認することができ、FTBLの機器配置の検討を進める事が可能となった。KEKBは連続運転さ

れており2週間に1度の保守日にしか立ち入り出来ないため、この3次元モデリングは、FTBL全ての機器の設計、製作を進めていく上で不可欠であった。

図3 γ 線が通る四極電磁石スリット

γ 取り出し用真空ダクト製作

富士直線部に於いて、陽電子は縦方向偏向電磁石で一旦下方にシフトし、電子は（交差用）偏向電磁石2台を用い外側から内側にシフトさせ、2リングは交差する。約100 mに及ぶ富士直線部上流において、8 GeV電子ビームと残留ガスの衝突で出てくる制動放射 γ 線は直進し、交差部最初の偏向電磁石中の真空ダクトに当たる。 γ 線を大気中に取り出すため、放射光に対する冷却を確保しながら取出し部の厚さを極力薄くした銅の真空ダクトが新規製作された。このダクトは幅広のため、偏向電磁石のコイルサポートを改造する必要があった。

四極電磁石 スリット孔加工

真空ダクトを出た γ 線は直進し、直ぐ下流の四極電磁石の鉄芯に当たる。 γ 線を通すため、鉄芯に横全幅30 mm、縦全幅10 mmのスリット孔を空ける（図3）。設置されている四極電磁石と同仕様の磁石に予めスリット孔を空け今夏の建設時に入れ換えた。磁場の対称性を維持するため、スリット孔は本来必要なリング外側だけでなく、左右対称位置の内側にも空けた。また磁場測定を行い、スリット孔の影響が無視出来る範囲であることを確認した。

コンバーター

四極電磁石スリットを通り抜けた γ 線は5 mm厚のタングステンコンバーター（図4）に当たり、電子陽電子対となる。発生した電子をFTBLで富士実験室に設けられたステージ上のターゲット点に導く。

FTBL 電磁石

富士テストビームラインの設計は、可能な限り既存の電磁石や電源の再利用を図り、建設コストを押さえる方針の基に進められた。

FTBL電磁石システムの構成は上流から、B1L

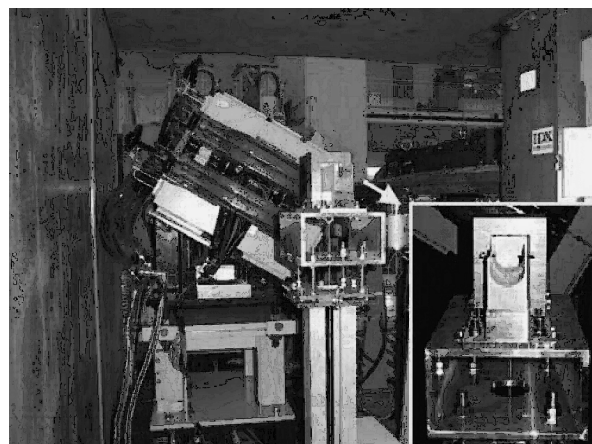


図4 コンバーター

B1S Q1 Q2 B2 B3 B4 Q3 B5L B6L Q4 B7L と計12台の電磁石が並ぶ。表1に電磁石仕様を纏めた。B2~4の3台が新規製作、それ以外は再利用である。ビームラインの光学条件から、電磁石はビーム軸回りに回転し、更に進行方向にも傾斜して設置されるため、3次元アライメントが必須である。そのため最低3つの基準面が必要となる。再利用電磁石にはレーザートラッカー用の基準面を新規又は追加付けし、設置条件に合う傾斜（スロープ）架台も製作した。その傾斜架台の前後2カ所にも補助用にレーザートラッカー用基準面を付けることを原則とした。

TR Wiggler (WL 4台, WS 1台) : トリスタンのウイグラー電磁石（H型偏向電磁石）計5台が再利用された。まだ数台の予備がある。元々の定格は450 Aで1.2 T。FTBLで必要とされる磁場は1.2 Tだが、この電磁石に使用出来る電源の定格電流が300 Aであったため、磁石開口部に図5のような『入歯』を入れ磁石間隙を64 mmから40 mmへ狭め、300 Aで必要磁場を達成した。磁場測定はKEKB BTグループの測定ベンチで行われた。測定装置はストレッチワイヤー方式のハーモニックコイルで、プローブを静磁場中で回転させ、誘導される電圧を測定する。磁極中でプローブの位置を変え、磁場分布を得る。

レーザートラッカー用基準面を磁石鉄芯上部の所定位置に3個、補助用に傾斜架台の前後2カ所に取付けた（図6）。基準面は水準、高さ、前後左右の位置微調が可能な構造となっている。目視型の測量機器（望遠鏡、水準器、スケール）を用い、元々あった水準器用基準面で電磁石を先ず水平にアライメントし、磁極左右中心を示すケガキ線から新基準面の位置決めを行った（図7）。

FTBLでは電磁石毎にビーム軸回りの回転角度や

表 1 電磁石パラメータ

偏向電磁石	タイプ	B_{\max} [T]	I_{\max} [A]	有効長 [m]	磁場有効領域 w×h [mm]	電源	重量 [kg]
B1L, B5~7L	WL	1.2	300	1.0	80×40	A	3400*
B1S	WS	1.2	300	0.513	80×40	A	1800*
B2~4	new	1.2	500	1.64	80×40	B	2800**

四極電磁石	タイプ	B'_{\max} [T/m]	I_{\max} [A]	有効長 [m]	ボア直径 [mm]	電源	重量 [kg]
Q1, Q2	tr BT	16	50	0.525	52	C	390
Q3	LER	3.79	300	0.584	166	A	2070
Q4	LER	6.32	500	0.584	166	B	2070

WL: TRISTAN long wiggler, WS: TRISTAN short wiggler, tr BT: TRISTAN beam transport Q,
LER: KEKB LER Q.rf spare

*: with support, **: w/o support

電源

タイプ A : 12 GeV・PS ビームチャンネル 300 A 50 V

タイプ B : 12 GeV・PS ビームチャンネル 500 A 30 V

タイプ C : KEKB 真空グループ 60 A 35 V

Wall power : 400 V 300 A (富士実験室 A-side)

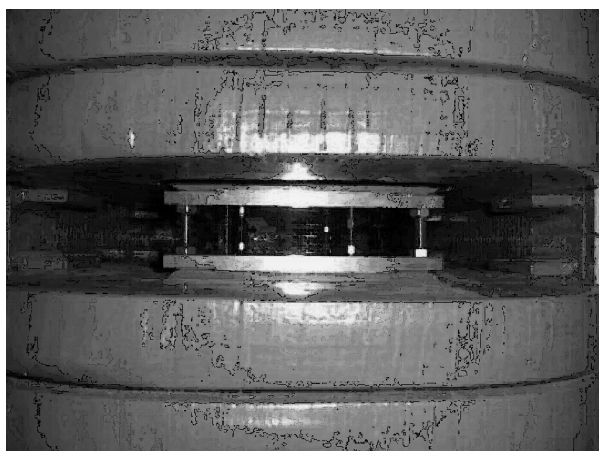


図 5 磁極間隙を狭める鉄の『入歯』



図 6 レーザートラッカー用基準面

ビーム進行方向への傾き等の設置条件が異なる。傾斜架台は、既存の架台の有効利用を計りながら、各磁石の据付け条件に合わせて、各々設計製作した(図 8)。B1L, B1S については、トンネル床の既設ケーブルラックを跨ぐ必要があったため、専用の嵩上げ架台も製作した。

TR BT Q : Q1, Q2 にはトリストラン BT ライン四極電磁石を再利用した。鉄芯上部の前後 2 カ所に設けられている従来のアライメント用ターゲット孔と電磁石上下対称面を示すケガキから、レーザートラッカー

用の基準面位置を決めた。ビーム軸回りの回転角を繰り込んで、FTBL ビーム軸真上の前後 2 カ所に新基準面を取付けた。磁石が小さいため新基準面は 2 つのみとした。2 つの基準面と磁石中心軸から 3 次元アライメントを行った。中心軸は磁石ボアに専用治具を差し込みトランシットで目視した。傾斜架台は各々に元々の架台も再利用し製作した。更に高さ調整に嵩上げ架台も用意した。図 9 は改造が終わった Q1 (or Q2) 電磁石である。

KEKB LER Q.rf : Q3, Q4 には KEKB LER 直線

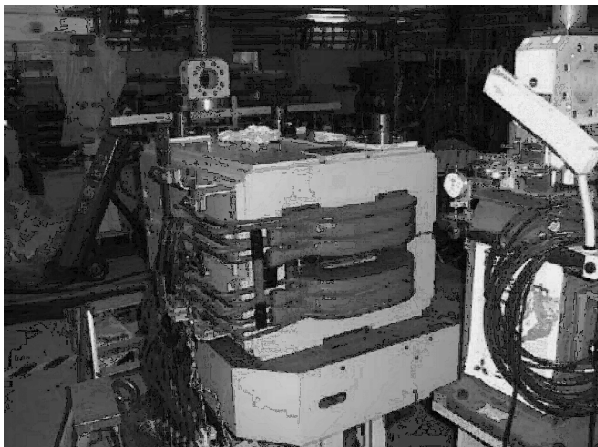


図7 新基準面位置調整



図10 Q3, Q4 追加基準面

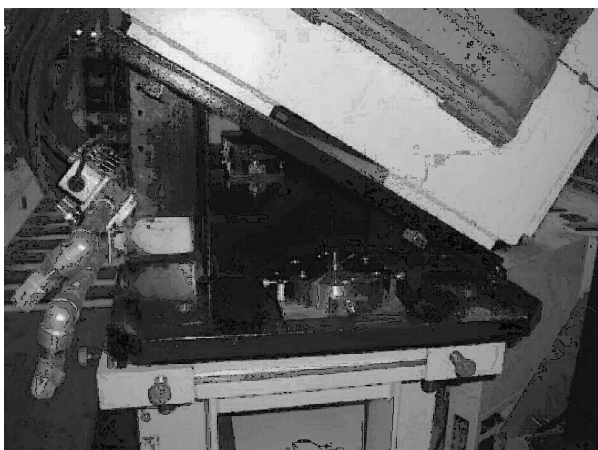


図8 傾斜（スロープ）架台

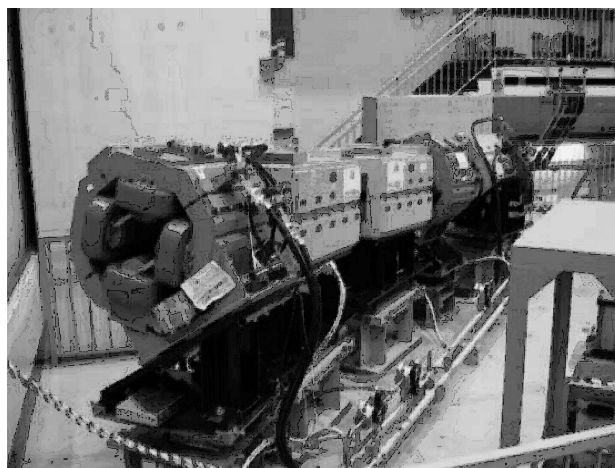


図11 富士ステージ上全景

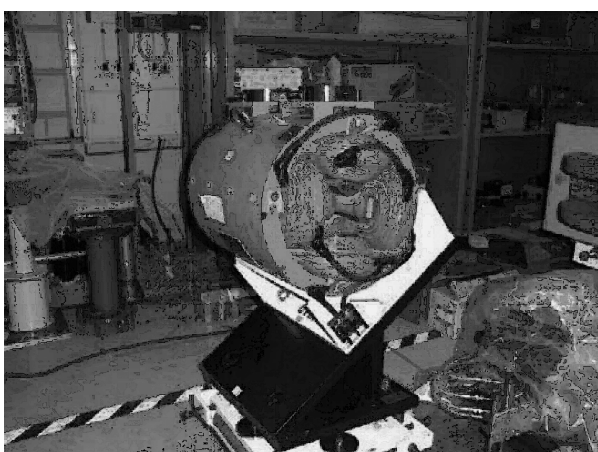


図9 Q1 (or Q2) 電磁石

部用四極電磁石の予備機を使用した。鉄芯の真上前後2カ所には既にレーザートラッカー用の基準面がある。図10に示す様に、鉄芯上部の斜め45°の面に1

個追加し計3個とし、更に補助用に傾斜架台の前後2カ所にも取付けた。傾斜架台は各々に製作、元々の架台も高さ調整のためカットし再利用した。図11は富士実験室ステージ上のビームラインで、最も手前に見えるのがQ3である。

新規製作偏向電磁石：KEKBの2リングの下を潜る3台の偏向電磁石は、その磁場強度と『薄さ』の制限から適当な再利用磁石が無く、新規製作となった。基準面は電磁石本体上部の3カ所に設け、傾斜架台は電磁石の設置条件に合わせ製作した（図12参照）。

磁場測定にはトリスタン四極電磁石測定用プローブ（ツインロングコイル）を使用した。電源を励磁し磁場を階段状にランプさせ、プローブに誘導される電圧を測定する。磁極間隙中でプローブの位置を変え、磁場分布を得る。BTベンチで測定されたTR Wiggler

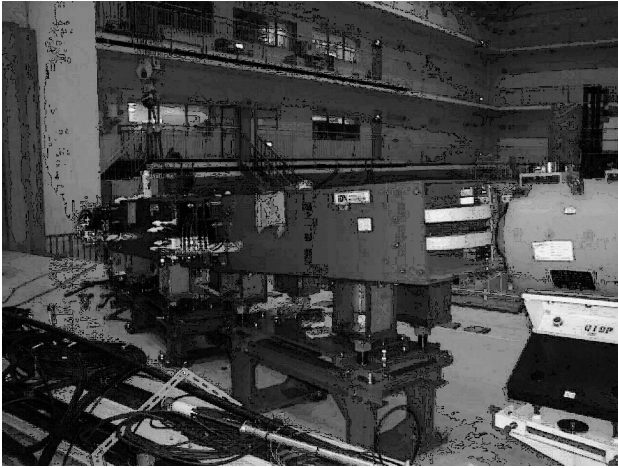


図12 新規製作電磁石 B2, 3&4

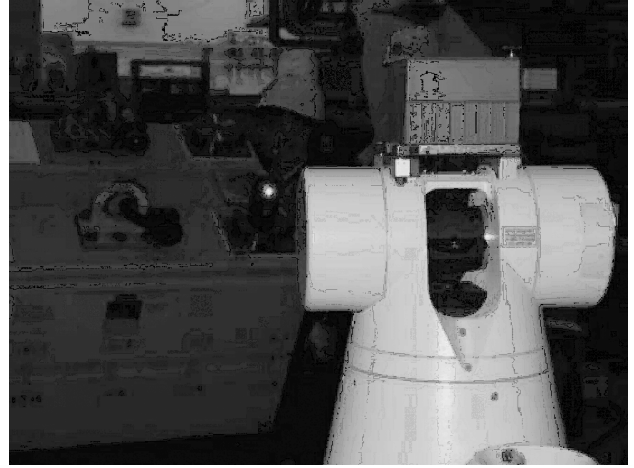


図14 レーザートラッカー. 向こうにターゲットで反射しているレーザー光が見える.



図13 富士ステージ下に整列した電源

も1台測定し、再利用電磁石と新規製作電磁石の磁場測定の較正を行った。

電源

12 GeV・PSのビームチャンネルで使用されていた300 A・50 V電源6台、500 A・30 V電源4台を再利用した。FTBLに使用された再利用品の中でも最古参であったが、電源関係者の多大な努力により、半ば死にかけの状態から蘇り、富士実験室ステージ下に整列した(図13)。その天寿まで、FTBLで元気に働いて欲しいものである。電源のリモート制御は大学チーム主導で準備され、運転体制が整った。

据付けと測量

富士テストビームラインの電磁石は、ビーム軸回りに回転し更に前方に傾斜し設置される。そのため3次元アライメントが必須であり、測量にはレーザートラッカーを用いた。レーザートラッカーを使用し電磁石を水平面内に高精度で設置することは、今までに幾

度も経験があるが、光学的な測量機器での目視によるクロスチェックの手段がないFTBLの様な据付けは今回初めてであった。測量はトラッカーの数字とラティス設計値の比較という、例えるなら視界ゼロでの『計器飛行』の様な作業であった。また加速器トンネルのコンクリートシールドが戻って来ると、FTBL全体を見渡す事が出来なくなり、修正出来ないという正に『一発勝負』ということもあり、FTBL建設作業の中で最も心配していた処である。

レーザートラッカー：レーザを用い専用ターゲットまでの距離と方位を測定する。本体から発せられたレーザー光はターゲットの反射鏡で反射され本体に戻ってくる。本体はレーザー光を追い、ターゲットを自動追尾する(図14)。測量対象には専用ターゲットを精度よく置く仕掛け(測量基準面)が必要である。

座標系：ラティス設計座標と測量結果を比較するため、以下の3つの座標系を使用する。

KEKB座標系：KEKBリング中心を原点とし、直行3軸は各々、Gx軸は原点から日光実験室、Gy軸は原点から富士実験室(FTBLはここ)を向き、Gz軸は垂直上向き。KEKBリングやFTBLラティスが記述される基準座標系である。

レーザートラッカー座標系：レーザートラッカーの固有座標系で、レーザートラッカーのセッティングを変える度に変わるが、z軸は垂直上向き。3次元測量はこの座標系で行われる。トラッカーのz軸を信用するので、水平出しを正確に行う必要があった。既設のKEKBリング電磁石数台の位置を測定し、KEKB座標系と関係付ける。レーザートラッカーのセッティングを変える度に、或はアライメント作業中断の度に、

この測定を行う必要があった。

電磁石座標系：各電磁石に固有の座標系。電磁石の上下対称面に垂直な n 軸，磁石軸に平行な L 軸，これらと直行する t 軸を定義し，電磁石基準面位置をこの3軸で表す。3つの軸を KEKB 座標系で表せば，KEKB 座標系での基準面位置が出る。

前準備

事前の KEKB 保守日にレーザートラッカーをトンネルに持ち込み，およそのビームラインの射影をトンネル床に野書き，既設機器との位置関係を確認した。また夏の作業時に一番に撤去されるコンクリートシールドに，テストビームラインの貫通孔の位置出しを『現物合わせ』で行った。

電磁石プリアライメント

電磁石を先ず元の基準面で水平（水準）に置き，新たに追加したレーザートラッカー用基準面の位置を正確に3次元測量する。ここで得られた新基準面の位置データを以後のアライメントで使用する。電磁石を傾斜架台に乗せ，設計値通りの回転角度と傾斜にアライメントする。この状態で傾斜架台に補助用基準面を取付け，水平（水準）に調整する。

据付け

FTBL 建設の工程は非常に厳しく，KEKB の運転終了直後から開始された。据付けと測量は以下の手順で行われた。

- コンクリートシールドの撤去
- 真空グループにより，交差部真空ダクトの取り外し
- レーザートラッカーをセットする。レーザートラッカー座標系が決まる。
- KEKB 既設電磁石（その座標は既知）を数台測量し，レーザートラッカー座標系と KEKB 座標系の



図15 Q3 電磁石据付け

変換係数を求める。

- FTBL 各電磁石を測量しながら据付け，測量値を KEKB 座標系に変換する。
- 設計値と比較し，電磁石アライメントを修正する。設計値との誤差が許容範囲に入るまで，据付けと測量の一連の作業を繰り返した。

図 15 は電磁石の据付けの一例である。

2. コミッショニング

FTBL コミッショニングに備え，ビーム計測の準備が KEK と大学チームの協力で進められた。四極電磁石スリットとコンバータ近傍にはフォトンモニター，各電磁石の出入り口にはシンチレーションカウンターが取付けられた。カウンターの一部は複数のストリップから構成され，ビームトラジェクトリーをある程度の精度で特定出来る。これらカウンターで FTBL 上流からビームを調整すべく，KEKB 運転再開を待った。

運転再開の第1週目は，FTBL 電磁石からの漏れ磁場が本家 KEKB の立ち上げ調整に悪影響を及ぼす可能性を考慮し，FTBL 電磁石には通電せず， γ 線が四極電磁石スリットを抜けコンバータに当たって電子・陽電子対が生成された処まで確かめた。翌週，満を持して電磁石に通電，直ちにビームライン最下流でビームを確認した。複数のカウンターのコインシデンスを取ることで，FTBL を通過した電子数を計測した。後にテストビームラインのエネルギーを 2 GeV と 3 GeV に合わせ，鉛ガラスカロリメータでビームエネルギーを測定した。図 16 にその測定結果を示す。エ

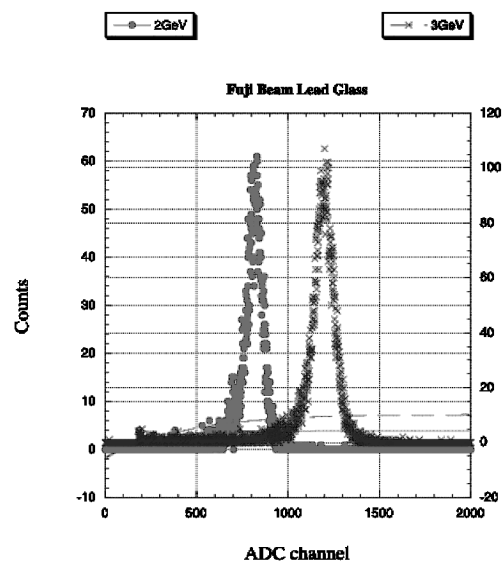


図16 鉛ガラスによるビームのエネルギー測定

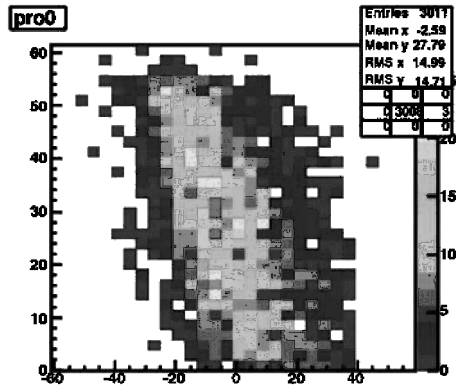


図17 アトラス SCT モジュールで測定されたビームプロファイル

エネルギー比に対応する場所に各々のピークが見えている。図17はアトラス SCT モジュールで測定されたビームプロファイルである。

現在既に試験運用ではあるが、測定器のビームテス

トが開始されている。来年2月からの本格運用まで、更なるコミッショニングは続けられ、ビームラインの調整も進むだろう。FTBL がテストビームラインとして役に立てば、建設グループ一同²⁾幸いである。

参考文献

- 1) 加速器学会誌 4 巻 2 号 (2007 年 7 月発行) p131-135. 「KEKB―富士テストビームライン (FTBL) (I)―その設計―」 幅 淳二, 森田 昭夫
- 2) FTBL 製作委員会 (メーリングリストメンバー, 敬称略)

家入正治, 池上陽一, 稲葉 基, 上原正治, 後田裕, 宇野彰二, 江川一美, 生出勝宣, 大澤康伸, 小野正明, 金澤健一, 川崎健夫, 川向裕之, 菊池光男, 久保忠志, 齋藤 究, 佐藤康太郎, ジョン・フラナガン, 鈴木義尋, 田島 治, 多和田正文, 坪山 透, 徳田 登, 中村 勇, 幅 淳二, 林 浩平, 樋口岳雄, 増澤美佳, 森田昭夫, 山岡幸雄