

富士テストビームライン 始動

FTBL コミッショニンググループ

新潟大学 自然科学系

川崎 健夫

kawasaki@hep.sc.niigata-u.ac.jp

2007 年 11 月 26 日

1. はじめに

KEK-PS, 特に $\pi^2/T1$ ビームラインは, これまで測定器開発のテスト実験に非常に有用に使われてきたが, PS のシャットダウンにより, 国内には検出器のテストに使える GeV クラスのビームラインがなくなってしまった。J-PARC でのテストビームラインが整備されるまでには数年以上は待たねばならず, 最近ではビームテストをしたければ, 国外に行かなければならない状況となっていた。

PS でのビームテストは, 国内で利用できる便利さもあるため, 若い大学院生が中心となって行われたり, 多数の修論テーマとしても役立つ。また, 若い大学院生にとっては, 加速器・ビームとはなんぞやということを実感できるまたとない場でもあった。このようなビームラインの必要性は誰もが認めるものの, 必要なコストの点からその整備は難しいと考えられていた。

さかのぼること一年以上前, 幅淳二氏 (KEK) より新しいテストビームラインのアイデアを聞いていた。KEKB 加速器の一部を利用することにより, 大規模な実験棟の建設なども不要であるという画期的なアイデアであった。ただ, 既存の実験装置の改造を行う必要があるため, KEK 内外の多くの人・実験グループの協力が不可欠である。幅氏曰く「こういうことは大学の若い人が声を上げないと進まないよ～」ということで, 周囲の若手研究者の意見を取りまとめて, ビームライン建設要望書を出すことになった (その経緯もあって, 幹事としてコミッショニングの面倒を見ることになってしまったのだが)。それから一年, ビームラインの設計・建設は進み, ついに「富士テストビームライン」として 10 月初頭からテスト運用を開始した。

本稿では, この富士テストビームラインの概要について紹介する。また, 2007 年 4 月頃から進めてきたコミッショニング作業と, ビームラインの現状についても説明する。

2. テストビームライン概要

富士テストビームライン (以後 FTBL) は, KEBK 加速器で発生する大量の Bremsstrahlung photon をコンバータ

で電子に転換し, それを実験エリアまで取り出すことによりテストビームを作る (原理的には陽電子も取り出し可能であるが, 現在はマグネット電源の極性により, 電子のみが取り出し可能である。FTBL の詳細は加速器学会誌である加速器 4 巻 2 号 (2007 年 7 月発行) を参照のこと[1])。

KEKB 加速器は電子リング (HER 8 GeV) と陽電子リング (LER 3.5 GeV) の 2 リング構造を持つが, Belle 検出器のある筑波実験棟とはちょうど反対側の富士実験室 (図 1) に, HER の長い直線部 ($\sim 100\text{m}$) がある。高い真空度 ($\sim 3 \times 10^{-8} \text{ Pa}$) であるが, 最大 1.3 A という高電流のため残留ガスなどにより, Bremsstrahlung photon が鋭くコリメートされて発生する。これまでは, 捨てられていたこの photon ビームを, ビームパイプや KEBK マグネットの一部を改造することで効率よく取り出し, 下流に配置したタングステンターゲット (5 mm 厚) に導く。対生成により発生した電子は最大 8 GeV のエネルギーをもち, その広がりは 3.5 mrad 程度とシミュレーションにより予測された。

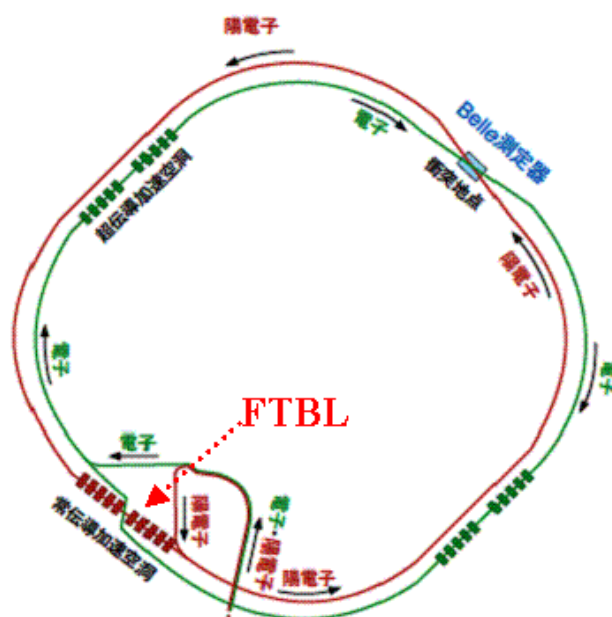


図 1 KEBK 加速器の構造

Belle 検出器から 180 度回った富士実験室に二つのリングの交差部がある。

ターゲットの下流約1mから始まる取り出しラインは、KEKBの二つの蓄積リングの下をくくりながら大きくカーブするというダイナミックな経路で実験エリアへ取り出される。ここで、必要な運動量のビームを選択して取り出すことにより、電子ビームラインとして使用する。図2にFTBLの全体図を示す。電子リング(HER)と陽電子リング(LER)が通っており、図の中心近くで交差している。電子は図の右上から左下へと進んでいる。取り出しラインには、ベンディングマグネット8台(図2中のB1L~B7)と、Qマグネット4台(同じくQ1~Q4)の計12台が配置

されており、電子はコンクリートシールド(B4とQ3の間)に開けられた直径10cmの穴を通り、左側のFTBL実験エリアへと導かれる。

これら、ビームライン本体の建設はKEKBグループの方々の多大な協力の下に行われた。最終的なマグネット設置工事は、2007年7月から9月のKEKBシャットダウン時に集中的に行われた。他に、マグネット用電源の設置と配線、冷却水の配管、KEKBの復旧作業などが行われ、すべての作業が予定通り9月末に終了した。写真1~3に、工事中と完成後のFTBLの写真を載せる。

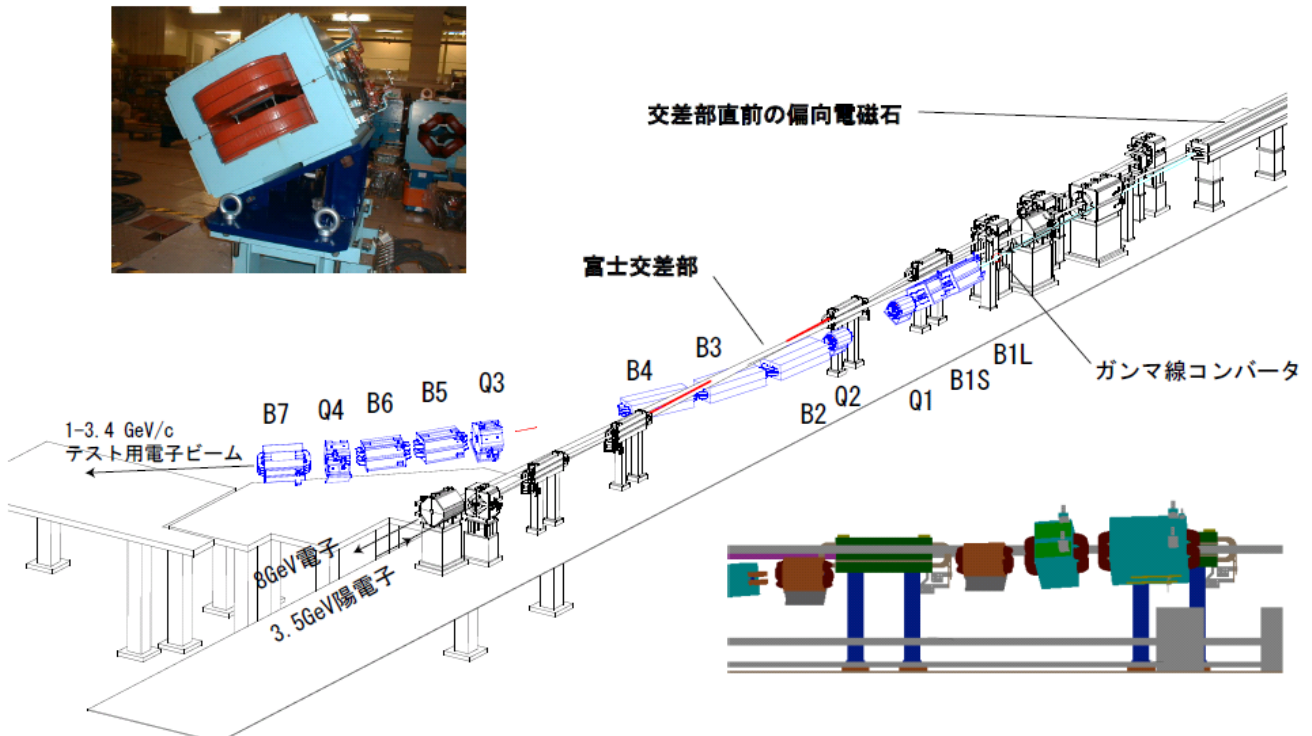


図2 富士テストビームラインの全体俯瞰

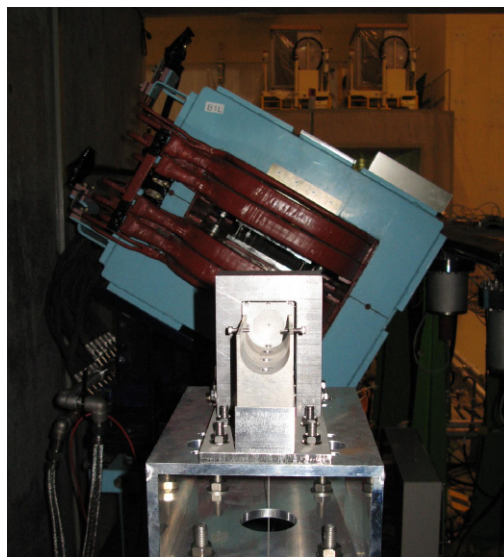


写真1 ターゲット上流より取り出しマグネットを臨む

後に見えるのは初段の取り出しマグネット。傾いているのは、電子を下方に向けながら横方向にも曲げるため。

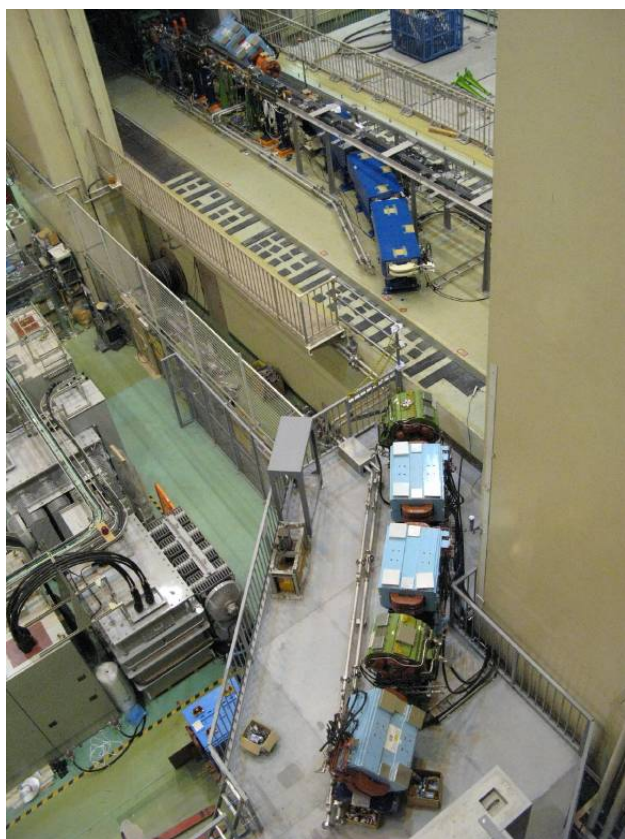


写真 2 建設中の FTBL

取り出しラインが KEKB のリングの下に潜っている様子が判る。



写真 3 完成した FTBL

現在は最下流のマグネットとエリアの間にフェンスがある。

3. コミッショニング準備

FTBL 建設作業は、加速器関係者の方々の協力で着々と進んでいた。われわれ実験屋には、テストビームのユーザとして、ビームラインの立ち上げ作業を行うことが求められた。当然ながらテストビームラインでは、実験エリアにおいて要求する運動量の電子ビームが、できるだけ大量に

欲しいわけである。それぞれのマグネットをどのような方法・手順で調整していくかがポイントである。まず、必要であるのは、取り出しマグネット用電源のコントロールシステム、そして電子や photon の位置やレートのモニターである。

マグネット電源のコントロールシステムは、池上氏 (KEK) と稲葉氏 (筑波技大) に担当していただいた。すべてのマグネットの磁場強度は較正されているが、電源 (写真 4) の出力にばらつきがあるため、すべてマグネットと接続した状態で較正し直された。これらの変換式を取り込んで、すべての電源を PC によりコントロールするシステムが構築された。実際のビームテストでは、このシステムを用いてマグネットの電流値を調節することになる。



写真 4 ステージ下には 12 台のマグネット用電源が並ぶ

電子モニターは、ベンディングマグネットの開口部に取り付けるため、空間的な制約が厳しく、大きいものは入れられない。また、コイルの近くでは漏れ磁場の影響もある。いろいろ検討した結果、ストリップシンチレータを WLS ファイバーで読み出すタイプのカウンターを用いることにした。幸い ILC カロリメータグループの信州大学から、大量のストリップシンチ (韓国・慶北大学グループの製作) と WLS ファイバーを提供していただくことができた。これを、16 チャンネルのマルチアノード PMT で読み出すことにした。漏れ磁場の影響を避けるために、WLS ファイバーを 30cm 程度の長さにしてコイルから遠ざけた。

設計・製作は新潟大学が担当した。十分薄く小さく、マグネット前後のコイル内側に取り付けられるモニターができた。シンチは幅 1cm で厚み 3mm ($x-y$ で 2 枚)、有感部は 4cm×8cm である。このモニターを合計 7 つ、マグネットの前後に設置した (写真 5)。読み出しチャンネル数は合計 84 チャンネルにもなる。この電子モニターの DAQ は筑波技大・筑波大が担当し、電子モニター上でのビームプロファイルをオンラインで表示するという便利なツールも準備された。

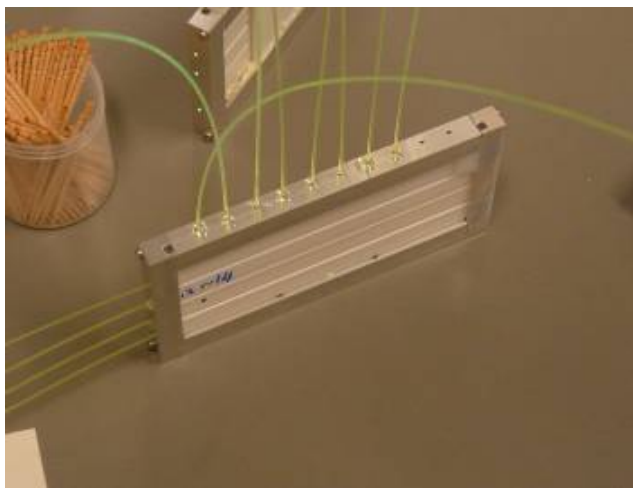


写真5 上：ストリップシンチレータを用いた電子モニター
下：上の電子モニターをベンディングマグネットの正面に取り付けたところ

9月始めごろからは、設置されたマグネットの前後にモニターを取り付け、上記の全チャンネルに対しケーブル敷設も行った（モニターからコントロールルームまで、長さ60mのBNCケーブルを、予備も含めて96本敷設した）。この大変な作業は、筑波大学・京都大学からの多数の学生諸君に手伝ってもらった。また、長さのそろった多数のケーブルは、関本氏（KEK）にPSで使用されていたものを借用させていただいた。

次に、photonモニターであるが、足立氏・上原氏（KEK）に担当をお願いした。KEKB HERで発生したphotonは、直進するとHERのマグネットに当たってしまうため、そこに貫通穴が開けられた（photonビームのサイズは1.5cm×0.5cm程度と予想されているので、磁場の変化を抑えるために、穴の大きさはなるべく小さく3cm×1cmにした）。Photonは非常に小さく絞れていると予想されるが、この穴を正しく通り抜けているかどうか、下流での電子の量に影響する。

クォーツを用いたチェレンコフカウンターが製作され、マグネット貫通穴の上流とターゲット直後に置かれた。下流のものはターゲットで発生した電子の数、つまりビーム強度をモニターする。上流のものは4つにセグメントに分かれており、photonビームが貫通穴を正しく通り抜けているかを確認できる。

4. コミッショニング

10月2日に、予定通りKEKBの運転が始まった。最初に行うべきことは、FTBLのマグネットのKEKBへの影響を確認することである。LERの下をくぐる1台のベンディングマグネットがLERに非常に接近しているため、漏れ磁場による影響がないとはいえないからである。その結果、FTBLのマグネットを最大値（3.4GeVに対応する）まで上げると、最大1mm程度の軌道の変化があることが判った。その後、影響を減らすために磁気シールドも追加したが、完全に漏れ磁場をなくすことはできていない。このため自由に磁場強度を変化させることはできないが、その後の調査でゆっくりとした変化（3%/分程度）であればKEKBのフィードバックにより補正できることが確認できた。

KEKBが通常の電流値で運転できるまでは数日を要したため、この間にモニターの動作チェックなどを行っていた。このころ既にターゲット直後の電子モニターでは、その中心付近に電子らしき信号が見えていた。そしてKEKBが定常運転に入った翌週に、全マグネットを起動することにした。

マグネットの設定は3.0GeVに合わせた。上流からモニターで順に見ていくと、シャッター直前（KEKBを囲むコンクリートシールドに開けられた穴のすぐ外側に当たる）まで、カウントレートが増えている。正直すぐにビームが出るとはまったく期待せずにシャッターを開けたところ、実験エリアに置いたカウンターで10Hz程度の計数が観測された。そこで、慌てて鉛ガラスカウンターを探してきてエリアに置き、上流のカウンターとのコインシデンスをとることにより、確かに電子がビームラインによって運ばれていることを確認した。

結局、この日はKEKB HERのビーム電流も700mA程度まで上がり、レートは30Hz以上になっていた。早速、FTBLユーザ会への報告、hecforumと核物理談話会へ速報を出した。初ビームを観測することのできた幸運なメンバーは写真6の8名であった。

翌週からは、詳細なコミッショニング作業を始めた。まずは、実験エリアでのビームの量とプロファイルの測定である。シミュレーションによる計算では、最大電流1.3Aの時に100Hz程度のビームが得られるはずである。真空の状



写真 6 初ビーム観測時の記念写真

態にも依存するが、700mA の電流であれば 30Hz 程度であることはそれほど不自然ではない（KEKB の真空がよくなるとビームの数が減るといふ 困ったジレンマが存在する）。

次に、実験エリアでのビームプロファイルを様々な方法で測定した結果、予想ほど絞れていないことがわかった（写真 7）。設計では実験エリア後端のストッパー上において 2cm×2cm 程度となると予想されていた。図 3 に、筑波大グループによる、アトラス SCT モジュールを用いて測定されたビームプロファイルを示す。実験エリアの中央付近で測られたものであるが、水平方向で 4cm、上下方向はそれ以上のサイズがあることが判る（縦横軸の単位は mm、上下はセンサーのサイズにより切れている）。

今回使用されているマグネットは、多数がトリスタンのウィグラーマグネットなどの再利用であるが、3 台のベンディングマグネットが新しく製作された。これらは、他の再利用マグネットとは形状がまったく違うため、エッジの効果などにより、実効的な積分磁場がずれる可能性があることが指摘されていた。そのため、これらのマグネットの電流を 1% 程度調整することにより、実験エリアでのビームの量を増やせる可能性がある。また、最終段近くの Q マグネットを調整することにより、ビームプロファイルを改善することも試みたが、現在のところ成功していない。これは、photon モニターや電子モニターなどを入れているため物質が多く、ビームライン中で散乱・反応することにより、運動量に対するアクセプタンスがシャープではなくなってしまっているためかもしれない。また電子は 20m 近くを飛行するため、空気による Bremsstrahlung の影響も無視できない。モニターは、調整が済めばいずれは取り外す予定であるが、取り出しライン部へのヘリウムバッグの導入も準備中である。ビームラインの本格運用は 2008 年 2 月からの予定である。それまでにはさらに調整を進めておきたいと考えている。

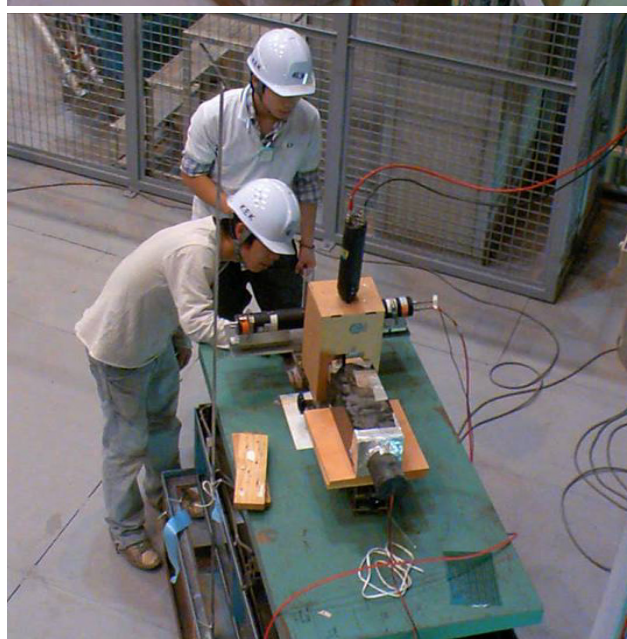


写真 7 トリガーカウンターを用いてビームプロファイルを測定しているところ

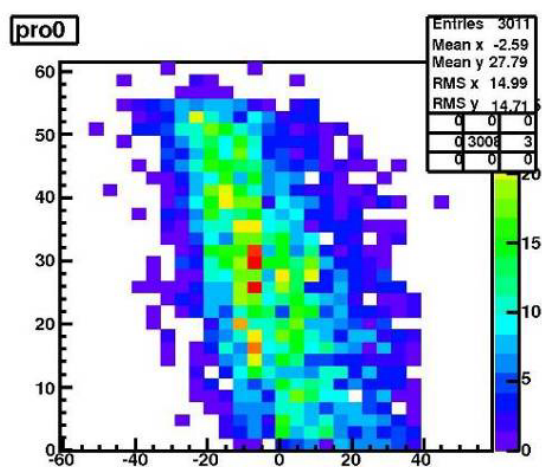


図 3 アトラス SCT モジュールによって測定されたビームプロファイル

5. FTBL ユーザ会

さて、ここで話を6ヶ月前に戻そう。FTBLは特定の実験グループに属するものではなく、あらゆる実験グループのユーザの利用を目的としている。建設にはKEKB/Belle関係者の協力が不可欠ではあったが、その運用はユーザである大学関係者が自主的に行うことが望まれていた。そのため、ビームラインの利用を希望する大学関係者が集まり“ユーザ会”を立ち上げることにした。ユーザ会は月1回程度KEKで開かれ、多くのメンバーはTV会議を通して参加した。

コミショニングの準備や方法についての、現場的な打ち合わせ以外に、実験エリアの整備などのについても意見交換を行った。ネットワークはどうか？ エリアにトリガークォンタムを数種類置いてほしい、電源は200Vも欲しい、ガスの使用はどうか、など使いやすいテストビームにするための要望の取りまとめを行った。幸い、ILCグループのご協力により、コントロールルームとして富士実験棟のB3奥の部屋を譲り受けることができ、非常によい環境を構築することができた（以前のVENUS実験のコントロールルーム）。

またテストビームの運用方法に関しても意見交換を行った。FTBLは、KEKBの運転期間しか使用できないし、きっちりとしたビームタイムを決めても、そのとおりにはビームが出ないかもしれない。また、Belle実験に影響を与えないように運転しなくてはならない。そういう意味では、複雑な手続きを踏まなくても空いているときには気軽に利用できるビームラインにしたいと考えていた。

まず、ビームラインの立ち上がる11月は、コミショニングを含んだテスト運用であるとし、hecforumや核物理談話会から、利用希望・コミショニングへの参加希望を募った。結局、Belle SVD、T2K INGRID、ILCカロリメータ、筑波大PHENIXグループが、それぞれ1週間のビームタイムでテスト利用することになった（写真8）。このテスト運用の後、2008年2-3月のビームタイムから一般のユーザに開放する。

6. さいごに

兎も角も、測定器開発に十分使用できるテストビームラインが完成したため、11月2日からBelle SVDグループが記念すべき柿落とし実験を開始した。開始後4日目に最上流ベンディングマグネット用電源が故障するというアクシデントもあったが、Qマグネットの1台との接続を入れ替えることにより使用できる状態へは復旧できた。ただし、ビームが絞れていないため、エリアでのレートは1/3になっ

てしまった。11月16日には電源の修理が済み完全復旧した。

FTBLは、実験グループに関係なく利用できることを目的とし、KEK・大学の研究者・学生が実験グループに関係なく集まって、可能な限り必要な資材・人手を持ち寄って作る“手作りのビームライン”の趣旨で立ち上げ作業を行ってきた。たとえば、モニターは各大学から手持ちのものを持ち込んで自作したし、実験エリアに置かれている可動台は筑波大から借用させていただいているものである。実験グループの枠を超えて、非常に多くの方に協力していただいた。これもひとえに、旗振り役である幅氏の顔の広さ（と皮の厚さ）がなせた業といえよう。



写真8 Belle SVDのビームテスト風景

今回、ビームラインを一から立ち上げるという貴重な経験をさせていただいたことに、私自身非常に感謝している。もちろん作業は大変だったが、とにかく楽しかったの一言に尽きる。また、今回のコミショニングには各大学から多数の若い学生諸君に参加してもらえた。こちらが指示などせずとも、得られた結果について議論し、必要な機材を大学から持ち込んで、新しくアイデアを出しながら進めていく姿をみていて非常に頼もしく思った。宇宙線では味わえないビームテストの醍醐味を味わってもらえたのではないかなと思う。

FTBLは測定器開発に利用できる能力を持ったビームラインとして立ち上がったが、今後もさらに使いやすくするための調整・整備は継続して行っていく予定である。国内にある3GeV（最高3.4GeV）の電子ビームラインは利用価値が高いであろう。どんどん利用して成果を上げていただきたい。また、改良点も指摘していただきたい。新しい測定器の開発にFTBLがお役に立てれば幸いである。4月以降の運用予定は現時点では未定であるが、KEKBの運転計画が決まり次第、利用の募集を行いたいと考えている。

富士テストビームラインは、KEK 関係諸氏、特に KEKB グループ・素核研ビームチャンネルグループのご協力の下に設計・建設されました。また、その他の方々（放射線科学センター、計算科学センター他）にもさまざまな内容でご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

また、FTBL コミッショニンググループの若い方々、特に京都大学、筑波大学、筑波技術大学、東京工業大学、新潟大学の大学院生・学部生諸君に感謝いたします。

- [1] 幅淳二, 森田昭夫, 「KEKB - 富士テストビームライン (FTBL) (I) - その設計」, 加速器学会誌 加速器, 4 巻 2 号, 131-135, (2007 年 7 月).