

測定器開発テストビームラインのコミッショニングおよび利用状況

花垣和則¹, 池上陽一¹, 坂下健¹, 中村勇¹, 長橋進也², 野上隆史², 本田融², 満田史織²

¹KEK 素粒子原子核研究所, ²KEK 加速器研究施設

Recent commissioning and status of PF-AR test beam line

Kazunori HANAGAKI¹, Yoichi IKEGAMI¹, Ken SAKASHITA¹, Isamu NAKAMURA¹,
Shinya NAGAHASHI², Takashi NOGAMI², Tohru HONDA², Chikaori MITSUDA²
¹Institute of Particle and Nuclear Studies, ²Accelerator Laboratory

Abstract

PF-AR の新たなビームラインとして測定器開発テストビームラインが加わった。2020 および 2021 年度の 2 年計画で建設され、2021 年の秋の運転からコミッショニングを開始した。テストビームラインの概要と建設に関してはすでに [1] で報告されているので、本稿では建設以降のコミッショニングについてと、2022 年秋以降の試用運転の様子を報告する。

1. はじめに

2019 年度末に、PF-AR 南実験棟に測定器開発テストビームラインを建設する計画が立ち上がった。粒子検出器開発においては粒子ビームを使った試験が不可欠であるが、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にはそのような目的で使える施設がなかったため、放射光実験施設、加速器研究施設、素粒子原子核研究所という組織横断的な協力のもと GeV オーダーの電子ビームを供給するビームラインを建設することとなった。

測定器開発テストビームラインでは、PF-AR の蓄積電子ビームのハローにワイヤ標的を挿入し γ 線を生成させ、その γ 線をさらにコンバータに入射させることで電子陽電子対を生成させる。生成された電子は四極電磁石群と偏向電磁石によって蓄積リングから外に取り出され、新たに建設されたビームステージ上でテストビームとして利用される (Fig. 1)。このテストビームラインの詳細と建設の様子については [1] に記されているので、本稿では、建設後のコミッショニングと、大学共同利用運転ではないものすでにユーザーが試用を開始しているのか、どのように利用され始めているかをお伝えする。

2. コミッショニング

2021 年夏のシャットダウン時に、加速器研究施設第 6 研究系の方々の活躍により、1 年半かけて準備されていた電磁石、ビームダクト、標的挿入システムなど全てが蓄積リング内およびビームステージ上に設置され、さらには配線や冷却系の繋ぎ込み作業が行われた。その後、年 3 回の PF-AR 運転時のマシンスタディを利用して、標的の挿入・ビーム照射試験を段階的に行った。



Figure 1 View of the test beam area (beam stage) for users in AR South building. The left area inside the fence is for users, and the right for beam extraction components such as quadrupole magnets and beam shutter.

2-1. 標的挿入・ビーム照射試験

2021 年第 3 期運転時に、初めて標的駆動および照射試験を行った。標的はカーボンナノチューブ (CNT) ヤーンとグラファイトシートの 2 種類で、上流側に CNT 標的、下流側にグラファイト標的が配置されている。通常は標的は待避位置にあり、ビームからは見えないようになっている。標的を保持しているビームダクトには覗き窓が設けられていて、運転中でもカメラによりビームダクト内部を目視できるという画期的なアイデアが採用されている。この仕組みを利用して、カメラでビームダクト内部の様子を見ながら標的を駆動し、徐々にビームに近づけた。蓄積ビームのエネルギーは 6.5 GeV で、トップアップは無しの状態

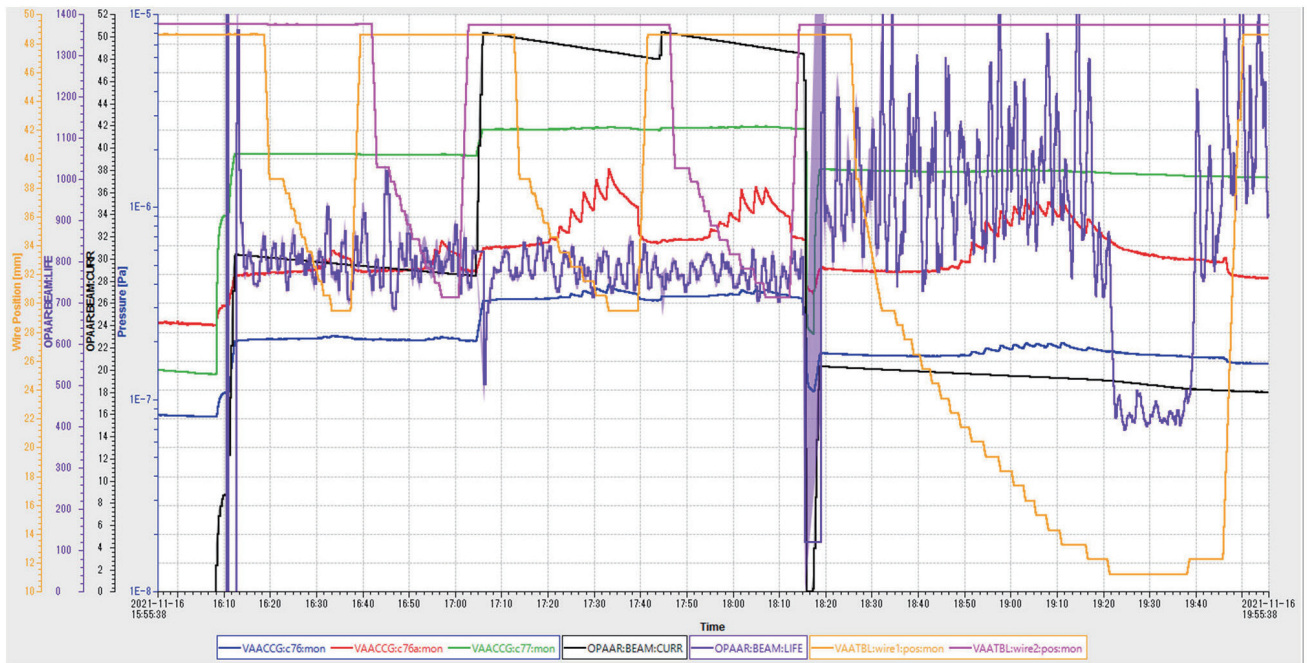


Figure 2 Target insertion test with 6.5 GeV storage beam in decay mode. The orange shows the location of upstream wire target, the red vacuum near the target, and the purple the beam life time.

で試験を行った。時系列に沿ったその時の様子を Fig. 2 に示す。橙色が標的位置を表す。縦軸はビーム中心と思われる位置からの距離を表すもので、徐々にビームに近づけ、ある段階で一気に引き抜いている様子が見て取れる。赤は真空度で、標的を挿入するとわずかに悪化、焼き出されて徐々に回復というパターンを繰り返している。紫は蓄積ビームの寿命で、ふらつきはあるものの標的の位置がビームから約 11 mm の位置まではほぼ変わらず、11 mm より近づいたところで半減した。この試験の収穫としては、標的を動かさない限りビームは安定しており、標的をビームに近づけたことによる HOM（高次モード）による発熱や放電現象が見られなかったことである。蓄積リングの中にワイヤ標的という異物を入れたものの、予期せぬ不安定性が発生しなかったことで、次の段階へ進む目処が立った。また、後日、蓄積電子ビーム近傍に設置されたビーム取り出し用の電磁石群を励磁して、それらの電磁石からの漏れ磁場が蓄積ビームにどのような影響を及ぼすかを確認したところ、影響は受けるものの、フィードバックによりキャンセルできることがわかった。これらにより、ビームを取り出すための準備が整った。

2-2. ビーム取り出し

前のセクションで述べた試験結果を受けて、2022 年の第 1 期運転時にビーム取り出し試験を実施した。蓄積ビームの観点からは、前回の標的駆動照射試験と全く同じで、標的を徐々に電子ビームに近づけたただけだが、前回との違いは、蓄積ビームトンネルに設けられたビーム貫通孔の直後に設置されたビームシャッターを開放し、かつ、ビーム取り出し用電磁石を励磁したことである。これによ

り、 γ 線コンバータで生成された電子がビーム貫通孔を通過し、ビームステージ上に到達するはずである。Fig. 1 で見られる 4 台の四極電磁石の上流と下流に PMT（光電子増倍管）を取り付けたシンチレータを設置し、それらのコインシデンスでビームレートを測定した結果を Fig. 3 に示す。蓄積電子ビームのエネルギーは 6.5 GeV で、測定開始時のビーム電流は 50 mA であったが、トップアップはしていないのでビームレート測定時のビーム電流は 50 mA より小さい。また、この時、標的はグラファイトシートで、ビーム取り出し用電磁石群は、2 GeV のビームを取り出す設定であった。青点を取り出しビームレート、赤点は蓄積ビームの寿命で、横軸は挿入した標的の位置を

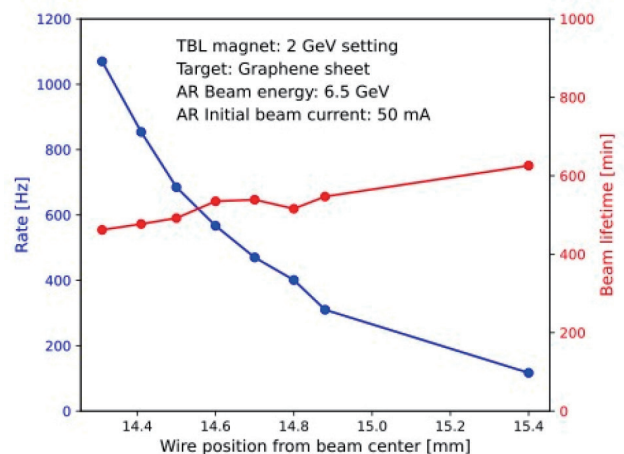


Figure 3 Extracted beam rate and lifetime of stored beam as a function of target position.

表す。図からわかるように、標的が蓄積ビーム中心に近づくにつれてビームレートが徐々に上昇し、一方で蓄積ビームの寿命が滑らかに減少している。約2年かけて建設したテストビームラインに初めてビームが出た瞬間で、その場に立ち会った一同は喜びに沸いた。さらに、ビームステージ最下流にビームダンプの一部として設置した鉛ガラスの出力を見ると、ビーム取り出し用偏向電磁石の電流値と綺麗な相関があり、運動量分別を正しく行えていることも確認できた。なお、ビームレートについては、シンチレータの検出効率についての補正を行っていないし、ビームレートは標的をどれだけビームに近づけられるかに大きく依存するが、今回は初めてのビーム取り出し試験であることから、標的をアグレッシブに挿入することはしていない。よって、ここでお見せしているビームレートはあくまで参考値と考えていただきたい。

2022年の第2期運転では、第1期に引き続きビーム取り出し試験を行い、ファイバートラッカーを用いてビームの形状測定を実施した。その結果を Fig. 4 に示す。横軸は X が水平方向、Y が鉛直方向で、どちらも横軸の 32 mm の位置が想定しているビーム中心位置である。鉛直方向に関しては中心位置はほぼ想定通りであるものの、水平方向は見ての通り 20 mm 近くズレている。また、ビームの幅に関しても、ビーム輸送シミュレーションから予想してい

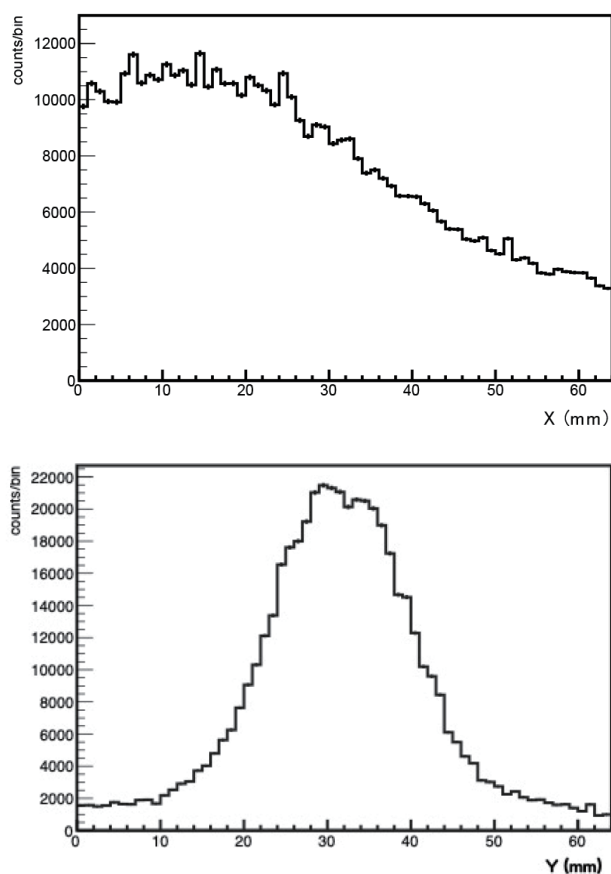


Figure 4 Beam profiles measured by the fiber tracker in horizontal (top) and vertical (bottom) directions.

る幅よりも数倍大きい。これらの問題は今後解決していく必要がある。特に、ビーム幅が絞れていないと、半導体検出器のような小さなデバイスを試験するときには利用できるビームレートが小さくなってしまいますので、早急に解決する必要があります。

2022年の第2期運転の標的挿入試験では、トラブルも一つあった。グラフィートシート標的はビームに近づけても蓄積ビームに不安定性を生じさせないが、CNT ヤーンの方は、ある時期からビームに近づけると寿命の急落などの現象が発生した。さらに試験を繰り返すと、最終的にはCNT ヤーン標的は切断されてしまった。もともと、覗き窓からの観察でCNT ヤーンは明るく輝いており、温度を測定できていないので推測になるが、赤熱しているのではないかと予想していた。切断の原因を特定することはできなかったが、グラフィートシートの時は蓄積ビームがよい振る舞いをしていることから、2022年夏のシャットダウン時に、上流側もグラフィートシート標的に交換した。

3. ビーム試用

2022年第3期運転では、大きな進展があった。テストビームライン運用における最大の課題は、ワイヤ標的という異物を蓄積ビームリング内に入れてもPF-ARが安定した運転をできるようにすることである。前のセクションで紹介した試験はマシンスタディの期間を利用して短期間で実施されたものであり、長期にわたる安定性に関する知見は得られていなかった。そこで、2022年第3期運転では、6.5 GeVのトップアップ運転中に標的を挿入保持したままにして、標的起因の蓄積ビームの寿命急落等の不安定性が生じないかを調べた。その結果、約2週間に渡る運転中、標的起因のビームロスも入射トラブルも発生しなかった。これにより、6.5 GeV 運転時に大学共同利用運転を開始する目処が立った。

同時に、長期安定性確認期間中、正式な大学共同利用運転ではないものの、ビームが出ていればユーザーが使えるというお試し運用を行った。測定器開発テストビームラインでは、数kHzの取り出しビームレートを目指しているが、標的を長期間挿入したままにするのは初めてだったので、標的の位置は想定よりもビーム中心からやや離れた15 mmに固定し、2 GeVでのビームレートは目標より一桁低い100から400 Hzであった。この期間中、6チームがビームを利用し、それぞれ「ドリフトチェンバーの読み出し回路の性能評価」「鉛ガラスの較正」「EMTの検出効率の測定」「LYSOとSiPMからなるタイミング検出器の時間分解能の評価」「SOI検出器の位置分解能測定」「鉛ガラスの応答の位置依存性測定」という試験を行った (Fig. 5)。各チームそれぞれ数日間のデータ収集であったが、ビームライン側にもユーザー側にも大きなトラブルなく全てのチームがデータ収集することができた。ただし、標的挿入位置が浅いことからもともとビームレートが低いことはわかっていたが、ビームの大きさが2022年第2期運転時と同様に想定よりもだいぶ広がっていたため、SOIのような小さな半導

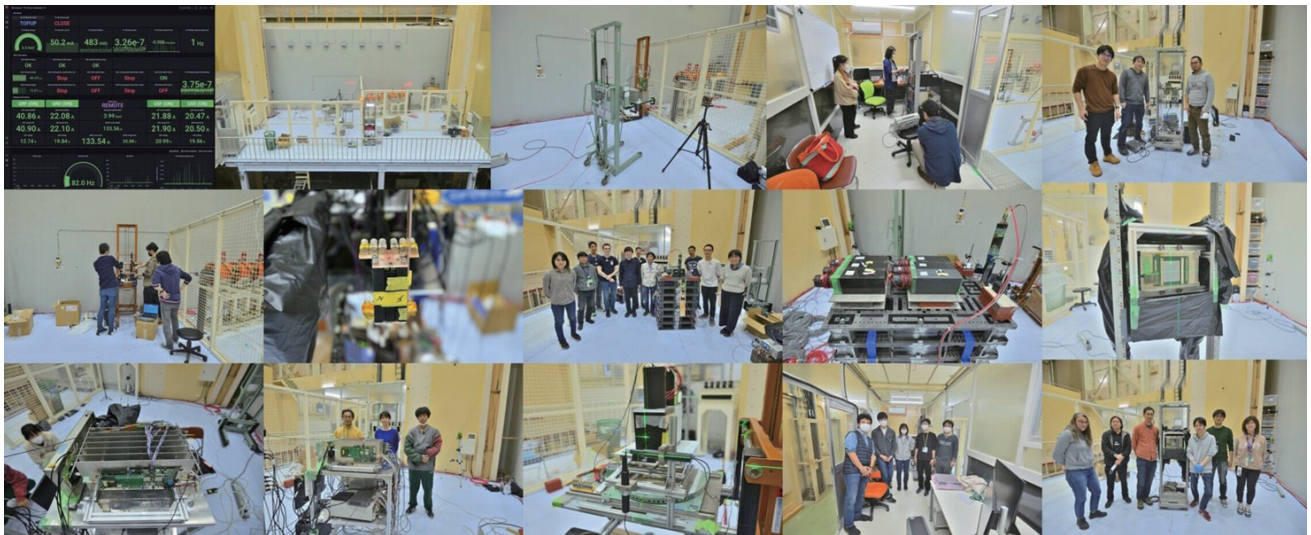


Figure 5 The first users of the Instrumentation R&D Test Beam Line.

体検出器の試験や、位置依存性を測定するような試験では、ビームレートの低さがより顕著となってしまった。

2023年の第1期運転時も6.5 GeVの運転期間中2チームがビームを利用し、それぞれ半導体検出器の応答を調べることができた。この期間中も蓄積ビームに異常が起こることなく安定運用できたことから、2023年の第2期運転以降の6.5 GeV運転時は大学共同利用運転を開始する運びとなった。また、5 GeVのトップアップ運転時も標的挿入保持を試み、ビーム不安定性が発生していないことを確認できたので、2023年の第2期運転では5 GeVの時も標的を挿入したままで運用することとなった。これにより、今後、蓄積ビームのエネルギーに依らず、テストビームラインの大学共同利用運転を見込めることになった。

以上のビーム試用期間を通して、ビームラインの課題がいくつか浮かび上がった。ビームが絞れていないことの原因究明が最優先課題で、ビームプロファイルの詳細測定を現在実施中である。また、現在は取り出したビームの運動量は、ビーム取り出し偏向電磁石の電流値を信じるしかないが、一度は運動量を直接測定する必要があると考えている。その他にも細々とした技術的課題があるが、違う観点として、試用とはいえユーザーを受け入れたことにより、受け入れ体制に関する課題も明らかとなった。ユーザー登録や放射線従事者登録などの書類処理、安全確保の体制、滞在中のユーザーのスペース並びに物品保管スペースの確保、果ては、駐車場および駐輪場の新設など、今後解決していかなければならない案件が積み上がった。

4. まとめ

2021年夏に完成した測定器開発テストビームラインは、約1年半かけてコミショニングを重ねてきた。その結果、PF-ARの放射光利用とテストビームラインの同時運用を開始できることとなった。GeVオーダーのビームを測定器試験用に供することのできる施設は世界でもそれほど多

くないことから、今後、多くのユーザーに活用されると期待している。

謝辞

本テストビームの立案から建設、そして運用に関わっていただいた全ての人にお礼申し上げます。

引用文献

- [1] Y. Kobayashi, 「光源の現状」, PF News Vol. 39, No.3, (2021).

(原稿受付日：2023年6月1日)

著者紹介

花垣和則 Kazunori HANAGAKI

素粒子原子核研究所 教授

〒305-0801 茨城県つくば市大穂

e-mail: kazunori.hanagaki@kek.jp

略歴：1998年大阪大学理学研究科博士課程終了、1998年プリンストン大学ポスドク研究員。2001年フェルミ国立加速器研究所ウィルソンフェロー。2005年フェルミ国立加速器研究所科学研究員。2006年大阪大学准教授。2015年素粒子原子核研究所教授。理学博士。

最近の研究：ATLAS実験にてヒッグス場研究と未知重粒子探索。

趣味：将棋観戦、庭の草むしり、スキー。