

J-PARC ハドロン実験施設における 新設一次ビームラインのビームコミッショニング BEAM COMMISSIONING OF A NEW PRIMARY PROTON BEAM LINE AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

小松雄哉*, 青木和也, 上利恵三, 秋山裕信, 新垣良次, 家入正治, 加藤洋二, 木村琢郎, 倉崎るり, 村杉茂, 里嘉典, 澤田真也, 高橋仁, 田中万博, 豊田晃久, 富澤正人, 広瀬恵理奈, 皆川道文, 森野雄平, 武藤史真, 武藤亮太郎, 岡村勝也, 小沢恭一郎, 山野井豊, 柳岡栄一, 渡邊丈晃
Yusuke Komatsu*, Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Yoshitsugu Arakaki, Masaharu Ieiri, Yohji Katoh, Takuro Kimura, Ruri Kurasaki, Shigeru Murasugi, Yoshinori Sato, Shinya Sawada, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Masahito Tomizawa, Akihisa Toyoda, Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Yuhei Morino, Fumimasa Muto, Ryotaro Muto, Katsuya Okamura, Kyoichiro Ozawa, Yutaka Yamanoi, Eiichi Yanaoka, Hiroaki Watanabe
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new beam line which transports 30 GeV primary proton beam became ready in January 2020 at J-PARC Hadron Experimental Facility. In this beam line, called "B-Line", about 0.1% of primary proton beam is branched from the existing A-Line. A commissioning of the B-Line was performed in May and June 2020, and the proton beam was transported to the secondary-production targets of a nuclear physics experiment for the first time. In the commissioning, the beam orbit was well controlled and the intensity of 10^{10} /spill was achieved, where the spill cycle is 5.2 seconds with 2 seconds of beam extraction. In addition, a reduction of beam halo and an improvement of the spill structure were also studied to realize better condition for the experiment. A legal facility inspection as a radiation generator was passed on 24th June, 2020, and the B-Line has become available to beam operation for the physics experiments.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設ではメインリング (MR) からの遅い取り出しビーム [1] を利用して多様な素粒子・原子核実験を展開している。従来、ハドロン実験施設では一次陽子ビームを標的に照射し、生成した π 中間子、K 中間子の二次ビームを実験に供給してきた。これら二次ビームラインに加え、2020 年に新たなビームライン "B ライン" が稼働を開始した。B ラインにより、30 GeV の一次陽子をそのまま実験に使用することが可能になり、原子核内にベクトル中間子を生成して高密度媒質中での質量分布を詳細に測定する実験が始まった [2]。2020 年 5 月から 6 月のビームタイムでは B ラインのコミッショニングを行い、ビームを無事実験エリアまで輸送する事に成功した。以下でコミッショニングの詳細について述べる。

2. J-PARC ハドロン実験施設新設一次陽子ビームライン (B ライン)

B ラインはスイッチヤードで既存の一次ビームライン (A ライン) から分岐する。ビームラインの全体図を Fig. 1 に示す。分岐部において、ビームの一部を Lambertson 電磁石 [3] と呼ばれる双極電磁石 1 台と静磁場セプタム 2 台によって曲げ、B ラインに輸送する。大部分のビームは Lambertson 電磁石の磁

極に開けた磁場の無い穴を通過し、A ラインに輸送される。従って、A ラインと B ラインは同時運転が可能であり、今後、ハドロン実験施設の利用形態は A ラインのみの利用と、A ラインと B ラインの同時利用の 2 種類となった。B ラインの最大ビーム量は、 2.6×10^{10} /spill (spill 周期 5.2 秒、ビーム取り出しは 2 秒間) であり、実験からの要請ビーム強度の最大値は 1×10^{10} /spill であった。

3. B ライン コミッショニング

2019 年の Lambertson 電磁石をインストール後のビームタイムで、A ラインにのみ輸送するビーム軌道を確認した [4]。今回は初めて Lambertson 電磁石を励磁してビームを分岐し、B ラインのコミッショニングを実施した。コミッショニングの目的は以下である。

- ビーム軌道を磁石中心を通るように調整する。
- ビーム強度を測定し、実験からの要請である $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$ /spill 程度に調整する。
- 実験にとってバックグラウンド源となるビームハローを、ビームライン上に設置したコリメータによって最小化する。
- スピル構造を一様にする。スピル中の計数率が安定していないと、実験に使用する検出器が放電して損傷したり、トリガー効率が低下するおそれがある。

* komatsu@post.kek.jp

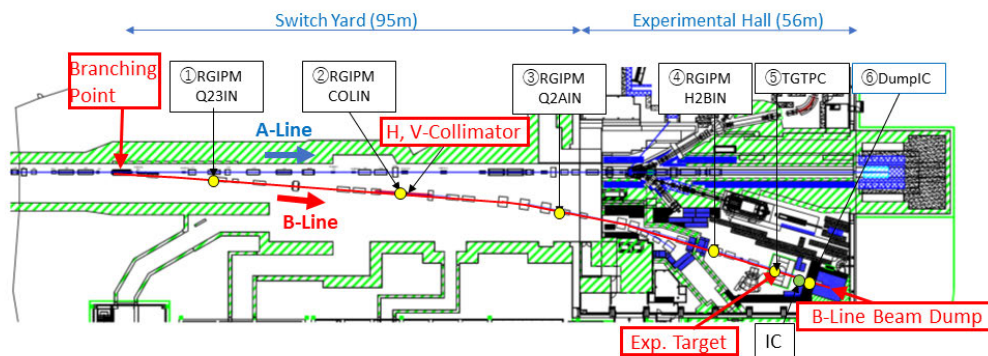


Figure 1: A drawing of the hadron beam line. The B-Line is newly constructed and branched from the A-Line.

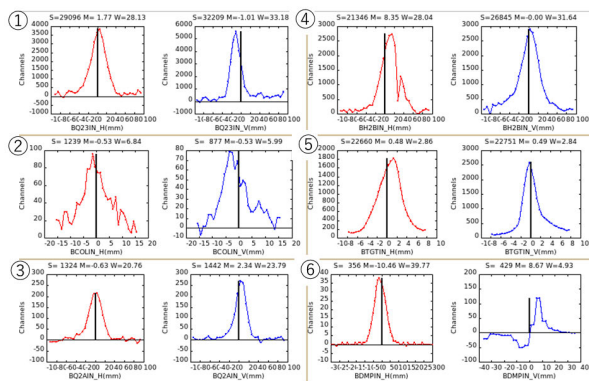


Figure 2: Beam profiles measured by RGIPMs, TGTPC and DumpIC. The numbers correspond to the positions in Fig. 1. Black vertical line is the center of the beam line.

4. ビーム軌道、ビーム強度の調整

B ラインは、ビーム軌道、ビーム・プロファイル、ビーム強度を測定するための各種検出器を備えている。

- **Residual Gas Ion Profile Monitor (RGIPM)** 低真空 (100~500 Pa) の電離箱で、非破壊型のビーム・プロファイル・モニターである [5]。B ライン上に 4 台設置した。配置は Fig. 1 の通りである。
- **Target Profile Chamber (TGTPC)** X, Y の読み出し電極 (500 μm ピッチ、有感領域 16 mm \times 16 mm) を備えた空気の電離箱 [6] で、実験標的近傍でのビーム・プロファイル測定に使用した。標的から 25 cm 上流に設置し、破壊型のモニターのためコミッション時のみ運用した。
- **Ion Chamber (IC)** Ar 封入型の電離箱でビームダンプ直上流に設置し、ビーム強度の測定に使用した。別途用意したアルミニウム膜にもビームを照射し、放射化法により校正した。

- **Dump Ion Chamber (DumpIC)** 空気の電離箱でダンプでのビームプロファイルを測定した。また、信号電流を電圧に変換し、波形を 1 kHz でサンプリングすることでスパル構造を取得できた。

ビーム軌道は RGIPM、TGTPC、DumpIC で確認した。B ラインは強度がせいぜい $1 \times 10^{10}/\text{spill}$ 程度であるため (A ラインは $5.5 \times 10^{13}/\text{spill}$)、RGIPM において信号強度を確保するためにダクト内の真空度を 100Pa まで悪化させて使用した。測定したビームの X, Y 方向の中心をモニターの中心 (ビーム軌道中心に合わせて設置してある。) に合わせるように、電磁石の磁場をチューニングした。チューニング後の軌道が Fig. 2 である。ビームプロファイルの分布の平均が、ダンプ以外のモニターで中心から ± 10 mm 以内、実験標的の所で ± 1 mm 以内に軌道を調整することができた。

ビーム強度は、ダンプ直上流に設置した IC により測定した。B ラインのビーム強度は、ビームライン分岐部の Lambertson 電磁石に入射する高さ位置 (Y_{SM}) によって調整した。Figure 3 は Lambertson 電磁石入射部の拡大図である。Lambertson 電磁石は縦に 2 つの開口部を備えており、上の開口部のみ磁場を有する。上の開口部に入射した一部のビームのみ磁場に

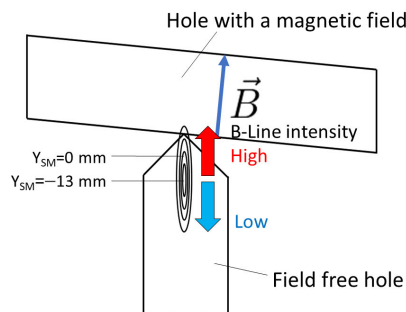


Figure 3: A schematic figure of the cross section of the Lambertson magnet and beam position.

よって曲げられ B ラインに輸送されるので、 Y_{SM} が高くなる程、開口部にしみだすビームの割合、つまり B ラインのビーム強度が増加する。 Y_{SM} は垂直方

向の偏向電磁石の電流値を変えることで調整可能である。

Aライン上の二次ビーム生成標的への照射位置を変えないように磁石の電流値をチューニングしつつ、 Y_{SM} を動かした。Bラインのビーム強度の Y_{SM} 依存性をFig. 4に示す。色はMRからの供給強度の違いである。今サイクルで主に使用したMRからのビーム強度50 kWで、実験で使用する最大強度 $10^{10}/\text{spill}$ を達成した。また、 Y_{SM} を変えることで、 $10^8 \sim 10^{10}/\text{spill}$ の範囲で強度を調整することも確かめられた。ここで、同じMRの強度でも、Y方向のエミッタンス(ϵ_V)が変わると依存性も変わる事が注目される。従って、MRから供給されるビームの状況が変わるたび(例えば週1度のメンテナンスによる加速器の再起動)にこの依存性を測定する必要がある。

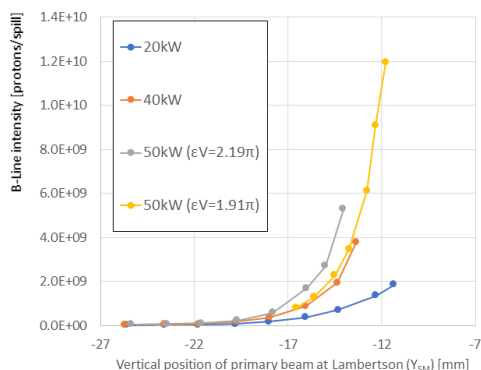


Figure 4: Results of the beam intensity extracted to the B-Line as a function of the primary beam position in vertical at the Lambertson magnet, Y_{SM} .

5. ビームハロースタディ

ビームコアの周辺に広がる、ビームと共に輸送される粒子をビームハローと呼ぶ。ビームハローは実験標的起源ではないので、実験にとってバックグラウンドとなる。従って可能な限り少ない方が望ましい。

ビームハローの起源は不明だが、MRから取り出された時点で既に生じている可能性や、スイッチャードまたはホールのビームライン上でのロスで生じた二次粒子である可能性が考えられる。もしコリメータよりも上流で生じていれば、コリメータの開口を絞ることで減らせるはずである。そこで、Bラインの水平方向(H)コリメータ、垂直方向(V)コリメータの開口に対するビームハローの量の依存性を調べた。ビームハローは、実験エリア内の最下流のQ磁石(Q2F)から下流40cmに設置した10cm角のシンチレータ3個のコインシデンスで計測した(Q2F Halo Monitor, Q2FHMと略す)。シンチレータはビーム中心から256mm離し、ビーム軸に平行に並べた。一方コリメータはH、Vともに1対のタングステン

合金ブロックから構成されており、ブロックは独立に、0~60mmの範囲で駆動できる。コリメータの概念図をFig. 5に示す。ブロックのビーム軸方向の厚さは400mmである。ここで、Hコリメータのブロックを北・南ブロックと呼び、Vコリメータのブロックを上・下ブロックと呼ぶ。各ブロックの位置に対するB-Line ICとQ2FHMのカウント数の依存性を測定し、なるべくビーム量は減らさずにハローを減らすことを目指した。測定したQ2FHM出力の北/南/上/下ブロック依存性をFig. 6にIC、示す。上記の目標に沿って、各ブロックの位置を(北, 南, 上, 下)=(-5, 3.5, 2, -4)mmと決定した(Fig. 6の赤線の位置)。その結果、調整後は調整前に比べて80%のビーム強度を確保しつつ、ビームハローは12%まで低減することに成功した。従って、コリメータの開口調整はビームハローに対して有効であった。ただし、実験としてはぎりぎり許容範囲、という程度のためさらなる改善策の検討が必要である。

ビーム強度の Y_{SM} 依存性と同様、最適な開口はMRからのビームの状況によって変わりうるので、加速器のメンテナンスや長時間停止した後などには再度チューニングすることが望ましい。

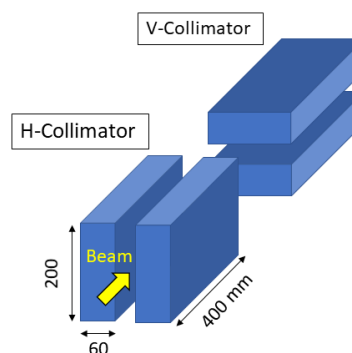


Figure 5: A schematic figure of the horizontal and vertical collimators made of tungsten alloy.

6. スピル構造の平滑化試験

Bラインのスピル構造はDumpICの信号電流を1msごとに読み出すことにより取得できたが、およそ10shotに1回の割合でスピルの最初に平均の5倍のビームが取り出される事象が発生した("burst shot"と呼ぶ)。DumpICで測定したburst shotのスピル構造の一例がFig. 7である。横軸の0はMRのフラットトップ開始時間である。このようにビームレートが急激に上昇すると、実験で使用している検出器が放電し、検出器に接続している回路が動作を停止してしまっ。従って、スピルの始めのビーム強度を抑えるため、予め Y_{SM} をより下げおき、スピルの間で電磁石電流をlinearに変動させて Y_{SM} を徐々に上げるという対策を講じた。電磁石の磁場を変動させる方法として、電磁石電源に対し一定時間だけ出力電流を上昇または下降させるような制御(ランプ制御)を行う回路を製作し、使用した。ランプ制御

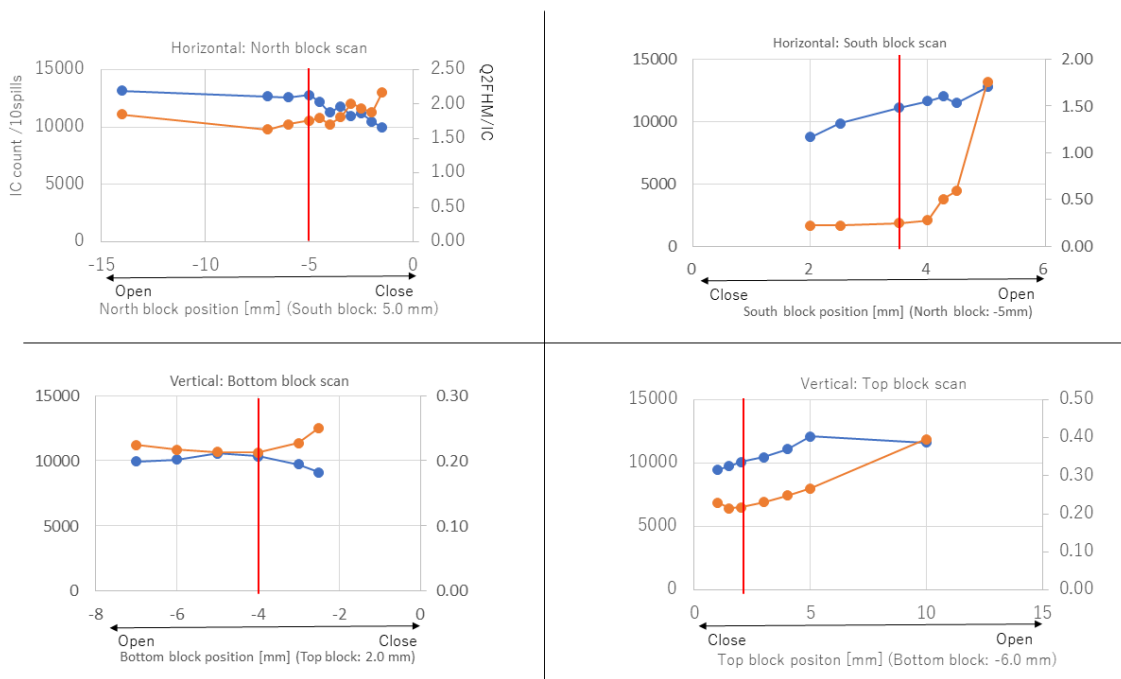


Figure 6: The dependences of the B-Line beam intensity(IC) and counts of Q2F halo monitor (Q2FHM/IC) on the collimator-block positions. Red lines show the decided positions of the blocks for user operations.

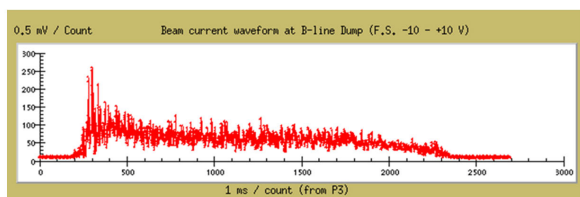


Figure 7: A spill structure of the "burst shot" measured by DumpIC.

するコントロール画面が Fig. 8 である。制御信号のパラメータは、加速器のフラットトップ開始のタイミングから波形の立ち上がりまでの時間 (DELAY)、立ち上がりに要する時間 (WIDTH)、波形の最高値 (PEAK) である。電源に対する入力信号と電源からの出力波形をモニターし、常に整合が取れていることを確認した。今回は、A ラインの垂直方向偏向電磁石 5 台 (V06, V08, V09, V14, V17) の電流制御を行った。Lambertson 電磁石よりも上流の 3 台 (V06, V08, V09) の調整で Y_{SM} を上げ下げし、下流の 2 台の調整で二次ビーム生成標的での照射位置が変わらないようにした。ランプ制御あり/なしでの、RGIPM で測定した Y_{SM} の時間変動が Fig. 9 である。ランプ制御なしでも Y_{SM} は下から上にドリフトしているが、ランプ制御ありではより顕著にスパイル始めの Y_{SM} を下げることができた。その結果 Fig. 10 のように、DumpIC で測定したスパイル構造において始めの強度を抑えることに成功し、スパイル内の平均の 5 倍を超えるピークがあった shot 数が、ランプ制御無しの場合には 18/119 shots であるのに対し、ランプ制御有りでは

は 4/122 shots に低減することができた。今回のランプ制御試験ではランプあり・無しでビーム強度を保存することができなかつたので今後は光学の検討を進め、ビーム強度を変えずにランプ制御できるようにしたい。

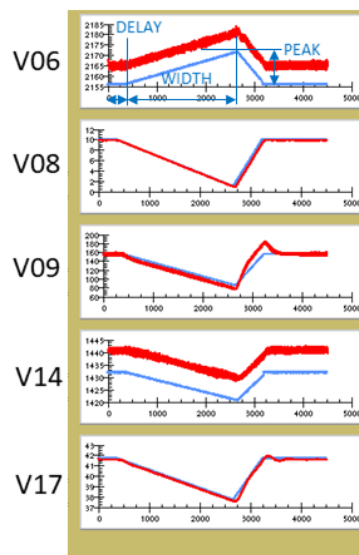


Figure 8: An application window to monitor control signals (blue) and return signals (red) from the electric power supplies.

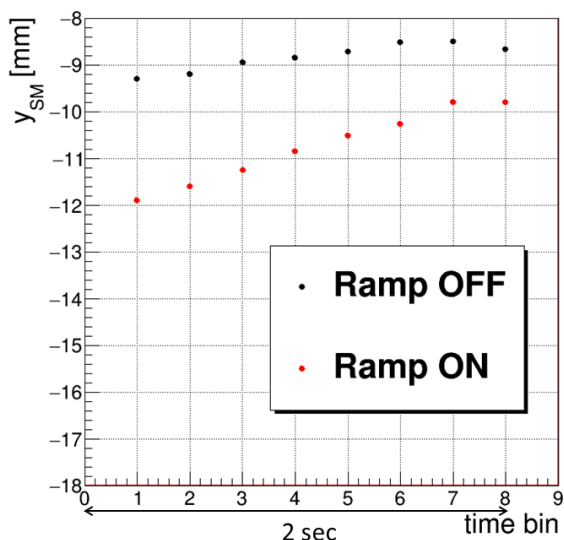


Figure 9: The drift of Y_{SM} in a spill. The averaged Y_{SM} over 100 shots are plotted.

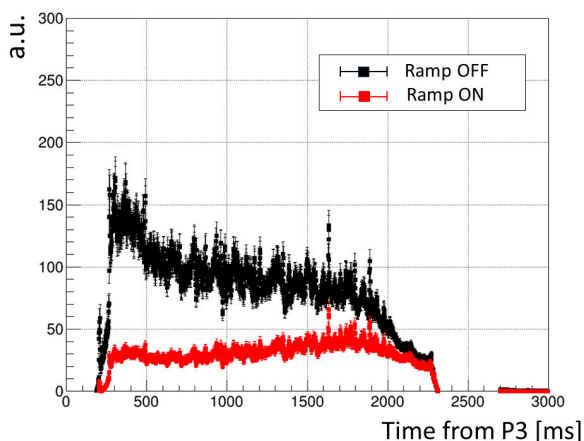


Figure 10: A comparison of the spill structure with and without a ramping control of magnet current. The waveforms are averaged over 100 shots.

7. まとめ

2020年5月に、ハドロン実験施設新設一次陽子ビームラインの本格的な稼働が開始した。2020年6月24日に施設検査に合格し、Bラインの利用運転開始となった。ビームライングループによるコミッションングにより、以下の成果が得られた。

- ビーム・プロファイル・モニター、強度モニターは正常に動作し、ビーム軌道を中心を通るようにチューニングできた。
- ビーム強度の Y_{SM} 依存性を測定し、実験からの要求強度の最大値である $10^{10}/\text{spill}$ のビームを達成した。
- コリメータの開口の調整はビームハロー低減に有効であることが確かめ、コリメータ・プロッ

クの最適な位置を決定した。

- 垂直方向の偏向電磁石電流値をスピル内でランプ制御することで、スピル始めの強度の増大を抑えることができた。

今後の展望として、さらなるビームハローの低減、ビーム強度を保存したスピル内のランプ制御を行い、より質の高いビームの供給を実現したい。

参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, "Present Status and Future Plans of J-PARC Slow Extraction", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp. 70-74, 2016.
- [2] http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_0606/pdf/p16-Yokkaichi_2.pdf
- [3] R. Muto *et al.*, "Development of Lambertson Magnet and Septum Magnets for Splitting 30-GeV Proton Beam in Hadron Experimental Facility at J-PARC", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 4, 0603904, Jun. 2016.
- [4] Y. Komatsu *et al.*, "Evaluation of Beam loss at Branching Point of the J-PARC Hadron High-p Beamline", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp. 61-65, 2019.
- [5] Y. Sato *et al.*, "Profile Measurements of Proton Beam with Residual Gas Ionization Profile Monitors at J-PARC Hadron Facility", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, pp. 485-487, 2011.
- [6] K. H. Tanaka, Y. Yamanoi, M. Minakawa, H. Noumi, M. Ieiri, Y. Kato, H. Ishii, Y. Suzuki, M. Takasaki, "Improvement in the Profile and Emittance Measurement System of the KEK-PS External Beam Line", Proceedings of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation (ABI), Tsukuba, KEK Proceedings 91-2 (1991), pp. 145-pp. 159, and KEK preprint 91-27.