

J-PARC 高運動量ビームライン標的近傍のビームプロファイル測定システム BEAM PROFILE MEASUREMENT SYSTEM IN THE NEIGHBORHOOD OF THE J-PARC HIGH-MOMENTUM BEAMLINE TARGET

武藤史真^{*A)}、青木和也^{A)}、上利恵三^{A)}、秋山裕信^{A)}、家入正治^{A)}、小沢恭一郎^{A)}、加藤洋二^{A)}、
倉崎るり^{A)}、小松雄哉^{A)}、里嘉典^{A)}、澤田真也^{A)}、高橋仁^{A)}、田中万博^{A)}、豊田晃久^{A)}、
広瀬恵理奈^{A)}、皆川道文^{A)}、森野雄平^{A)}、山野井豊^{A)}、渡邊丈晃^{A)}

Fumimasa Muto^{*A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Keizo Agari^{A)}, Hironobu Akiyama^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Kyoichiro Ozawa^{A)},
Yohji Katoh^{A)}, Ruri Kurasaki^{A)}, Yusuke Komatsu^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)},
Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Yuhei Morino^{A)},
Yutaka Yamanoi^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}

^{A)}Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A new 30 GeV proton beamline, the High Momentum Beamline, has been constructed for nuclear physics experiments at the J-PARC hadron facility. The first beam commissioning of the high-momentum beamline has been successfully performed in May and June, 2020. The proton beam with an intensity up to 10^{10} protons/5.2 sec cycle has been irradiated to three experimental targets, two 80- μm -thick copper targets and one 500- μm -thick carbon targets. These targets were placed in an airtight target chamber made of thin sheets of Mylar filled with helium gas to reduce the beam interactions. Since the experimental target is used in a strong magnetic field, an ion chamber can not be applied for the beam-profile monitor around the target. However, the beam profile data at the target position is essential for the experiments. We have prepared several beam-profile monitors in target chamber: a fluorescent plate, a target-sized scatterer and two thin wire scatterers. In this paper, we report the development of the target chamber with these monitors and the results of the beam commissioning data.

1. J-PARC 高運動量ビームライン

J-PARC ハドロン実験施設では、30 GeV まで加速された一次陽子ビームを二次粒子生成標的に照射し、生成したK中間子、 π 中間子、反陽子等を3本のビームラインで輸送し、それぞれで様々な原子核・素粒子実験を行っている。この既存のビームラインに加えて、30 GeVの陽子ビームを直接、物理実験に利用するための高運動量ビームラインの建設が2019年末に完了し、新たなビームラインとして加わった。高運動量ビームラインを加えたハドロン実験施設の概略図をFig. 1に示す。高運動量ビームラインは、既存の一次陽子ビームラインから0.1%程度のビームを分岐し、最大ビーム強度は 2.6×10^{10} 陽子/spill(周期は5.2 sec)と設計されている。2020年5月には初のビーム取り出しが行われ、 1×10^{10} 陽子/spillの強度で安定した運転が可能であることが確かめられた。これに加えて実施されたビームコミッショニングでは、ビーム強度、ビームロス、プロファイルが各種モニターにより確かめられ、実験に適切に供給できるよう調整が行われた [1]。

高運動量ビームラインで最初に実施されるE16実験では、高運動量のビームを用いて実験標的原子核内部に ϕ 中間子を生成し、その崩壊レプトン対から質量スペクトルの測定を行うことで、高密度環境下においては、カイラル対称性が部分的に回復し、ハドロン質量が減少する様子を確認出来ると見込んでいる [2]。この崩壊レプトン対の運動量測定のため、実

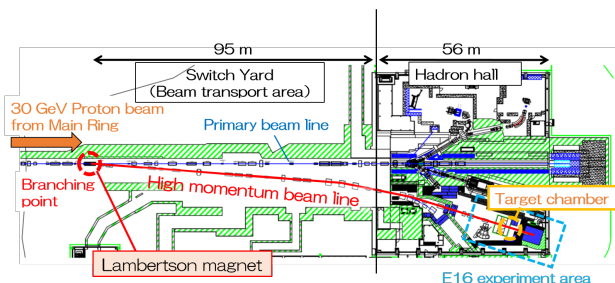


Figure 1: Schematic view of the Hadron experiment hall with the high momentum beam line.

験標的を納める標的チェンバー（以下、チェンバー）は、Fig. 2に示すように、最大磁束密度1.7 Tのスペクトロメータ電磁石の磁極内に設置される。そのため、ビームプロファイル測定のために、通常のイオンチェンバーは使用出来ず、チェンバーには3.1で紹介するビームプロファイルシステムを設ける必要があった。一方で、2.1~2.2の要求仕様のため、標的チェンバーは、低物質質量材料でしか製作出来ず、さらに、空気の放射化への対策のため、Heを封入して使用できるだけの気密性も必要であった。これらは、互いに相反する要求であるが、これを実現するため、気密性を維持しつつも、ビーム軌道上からビームモニターに必要な構造物を逃がす機構をチェンバーに設けた。

本論文では、磁場中でのビームプロファイルの測定システムと、低物質量化を両立した標的チェンバーの開発と、2020年5月から6月にかけて初めて測定された高運動量ビームラインの標的近傍のビーム分布について報告する。

* fmuto@post.kek.jp

2. 標的チェンバーの開発

2.1 ビームプロファイル測定のための要求仕様

Figure 2 に示すように、チェンバーはスペクトロメータ電磁石の磁極内に設置され、最大で 1.7T の強磁場が印加される。そのため、ビームプロファイル測定のために、通常のイオンチェンバーは使用出来ない。そこで、Fig. 3 に示すようなカタカナの「ト」形の BeCu 製金属棒 (散乱体) を使用する。鉛直方向、水平方向にそれぞれ、長さ 25 mm、幅 0.3 mm、厚み 5 mm の散乱体が伸びており、ここにビームを横切らせて使用する。ビームが散乱体に照射されることで、二次粒子がビーム下流方向に多数生成され、この様子をインタラクションモニター (以下、IM) で計測する。この散乱体を標的チェンバーに内包することで、標的近傍でのビームプロファイル測定を実現する。また、その様子を視覚的にモニターするため、蛍光板を内包する必要がある。内包した散乱体、蛍光板は、正確なビームプロファイルのため、製作・設置精度が ± 0.1 mm 以内である必要がある。また、蛍光板の様子は、カメラを用いてモニターするが、カメラに対するスペクトロメータ磁石磁場の影響を避けるため、チェンバーから、約 5 m 離れた場所に設置される。カメラまでの視線を検出器の間を縫って確保することも必要である。

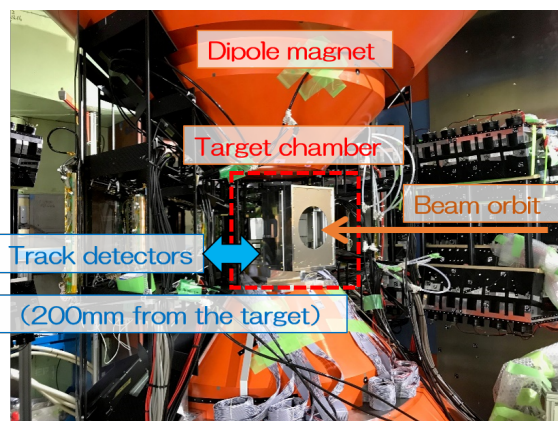


Figure 2: Photograph around the target chamber.

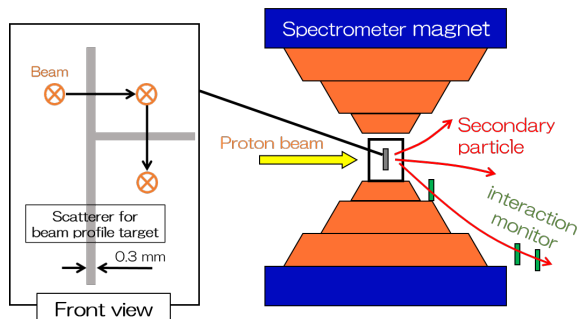


Figure 3: Schematic drawings around the target and the interaction monitor (IM), which counts a number of secondary particles produced in the scatterer. Also, the cross-sectional view of the wire scatterers are shown.

2.2 標的チェンバーの構造、構成への要求仕様

標的チェンバーは実験標的として、銅標的 (80 μm) 2 枚、炭素標的 (500 μm) 1 枚を内包する。標的厚みは 3 つ合わせて反応長の 0.2 % であるため、標的での粒子反応数は約 10 MHz となる。この標的を取り囲むように飛跡検出器である Silicon Strip Detector (SSD) が設置されている。SSD のレート耐性は、30 kHz/mm² ほどであり、実験標的からの距離も 200 mm 程度と近い。そのため、無用な二次粒子を生成しないように、チェンバーの構成部品はアルミニウムやマイラー等の低物質材料でなければならない。特に、陽子ビームや、生成されたレプトン対の軌道上は、マイラーのみで製作することが必要であった。加えて、空気の放射化を防止するため、チェンバーには He を密封して使用しなければならない。He を常時流入させることは出来ないため、実験期間中、He を保持できるだけの気密性を持つ必要がある。

これらの低物質化、気密性の要求仕様は、2.1 で必要な散乱体、蛍光板をビーム軌道上に設置する仕様と相反する。そこで、散乱体、蛍光板を内包した上で、気密性を損なうことなく、外部から、これらの標的・蛍光板をビーム軌道上から逃がせる構造とすることが求められた。

加えて、ビームを用いて飛跡検出器の設置位置を校正のため、ワイヤー標的をチェンバー内部に ± 0.1 mm 以内の設置精度で取り付けした。ワイヤー標的にビームを照射し、発生源が正確に決められた散乱粒子をトラッキングすることで、飛跡検出器の位置校正を行うことが出来る。

2.3 要求仕様のまとめ

以下に、標的チェンバーへの要求仕様をまとめる。

- 強磁場中でもビームプロファイル測定が行うために、散乱体、蛍光板を内包すること。
- プロファイル測定後に散乱体、蛍光板をビームから逃がせる機構があること。
- チェンバーの構成部品は全て非磁性かつ、低物質材料であること。
- ビーム、生成レプトン対の軌道上は、マイラーのみで製作すること。
- 空気の放射化対策のため、He を封入して使用出来るだけの十分な気密性を持つこと。
- 標的、散乱体、蛍光板、ワイヤー標的を ± 0.1 mm 以内の設置精度で内包すること。

2.4 製作と設置

Figure 4 に設計したチェンバーの概形を示す。まず、2.2 での要求仕様の 1 つであった散乱体と蛍光板をビーム軌道から逃がすための機構について紹介する。実験標的と散乱体は、共通の回転機構に設置され、外部からの操作によって、ビームに当たる標的を切り替えることが出来る。蛍光板についても同様に回転機構に取り付けられ、ビーム軌道に対して ON/OFF を操作できる。当初、回転機構の操作には真空部品の回転式フィードスルーを用いる計画で

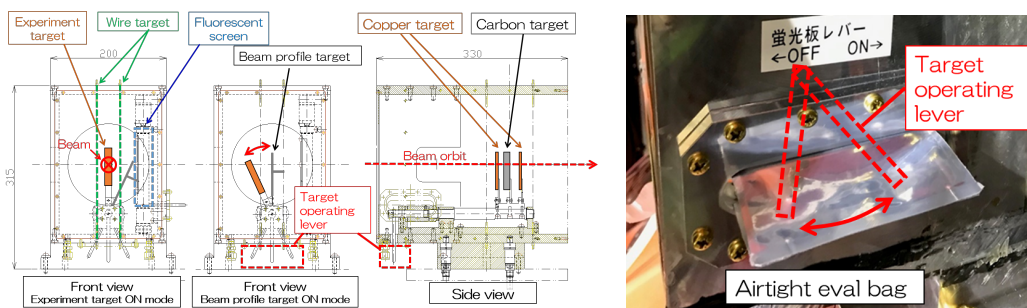


Figure 4: Drawings target mode of the target chamber. The target and the beam monitors are able to be manually switched from outside the chamber with keeping the airtightness (left). Photograph around the operating lever of the target chamber to switch between the target modes. The airtightness around the lever is kept by a low gas-permeable plastic bag made of eval (right).

あったが、市販のフィードスルーの多くは磁性体を含むため使用できなかった。そこで、回転機構から、チャンバ下段から外部に突き出した操作レバーによって、回転操作できる構造とした。実験標的と散乱体は開き角 25° で取付けられ、設計ビーム高さで、 35 mm 離れている。これは設計ビーム幅 1.5 mm に対して十分間隔が開いているため、ビーム照射時に干渉はない。操作レバー部の気密は Fig. 4 に示したエバル製のバッグをチャンバ本体にフランジ、Oリングを用いて取り付けることによって保たれる。操作者は、このエバル袋ごしに直接、操作レバーを掴み操作する。袋ごしの操作となるため、レバーノッチを上手く認識できず、回転機構による切り替え再現精度の要求を満たせない場合があった。そこで、バッグはある程度の柔軟性を持つ厚みで、十分に内部のレバーを操作できるように寸法を調整し、標的のモードのノッチを認識できるようなものを開発した。最終的な標的の設置精度、回転機構による切り替え再現精度は、トランシットを用いてビームライン軸に対して合わせて調整し、要求仕様の設置精度 $\pm 0.1\text{ mm}$ 以内を満たした。

次に、チャンバの気密性について紹介する。チャンバ側面は Fig. 5 に示すようなマイラー膜 ($16\mu\text{ m}$) によって密封した He の気密性を確保する。マイラー膜はエポキシ系接着剤によって貼り付けられ、その気密性を、加圧法およびスニファー法の 2 種の試験によって確かめた。加圧法においては、チャンバ内の空気を He で十分に置換、封止し、微差圧計を用いて、チャンバ内圧の減少から He の流出量を見積もり、リーク量は $4.6 \times 10^{-5}\text{ Pa m}^3/\text{sec}$ と推定した。スニファー法では、主要なチャンバ外枠の継ぎ目、ボルト周辺、フランジ、マイラー接着面をリークディテクターを用いて He リーク量を測定し、チャンバ全体からの He リーク量は $4.7 \times 10^{-5}\text{ Pa m}^3/\text{sec}$ であると見積もった。これら 2 種の結果に大きな矛盾はなく、空気の放射化量から要求された基準値 $2.57 \times 10^{-4}\text{ Pa m}^3/\text{sec}$ より十分小さいリーク量であることから、チャンバは十分な気密性を持つと結論付けた。

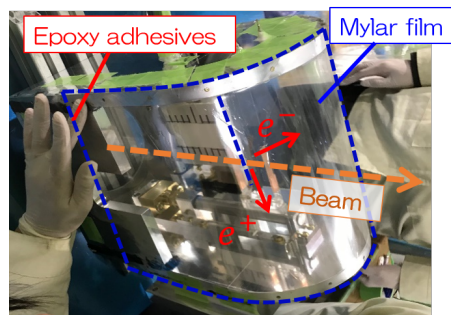


Figure 5: Photograph of the target chamber during assembling. The airtightness is keep using transparent $16\mu\text{ m}$ -thick mylar films which are glued to aluminum frames by epoxy adhesives.

3. ビームプロファイル測定

3.1 測定システム

E16 実験では、ビームチューニングによって、目標ビーム幅 $\sigma=1.5\text{ mm}$ 以下にまでビームを絞って実験に使用する。そのため、Fig. 3 にも示した通り、標的チャンバにプロファイル測定用の散乱体を内包し、実験時と同条件 (スペクトロメータ磁石 ON) でビーム幅を確認できる設計とした。ビームが散乱体に照射されることで、二次粒子がビーム下流方向に多数生成され、この様子をインタラクションモニター (以下、IM) で計測する。IM は 3 つのシンチレーションカウンタで構成され、標的に生成された粒子以外の計測を防ぐため、スペクトロメータ電磁石の磁場内で標的からの二次粒子のコインシデンスが取れるように配置した。IM を通過する二次粒子数は、散乱体を通過したビーム電荷量に比例するため、ビーム分布を測定することが出来る。散乱体を通過するビーム電荷量は、各ショットごとのビーム総量によっても変わるため、ビームダンプに設置されたイオンチャンバで測定したビーム総量の値をビーム分布計算時に使用する。

散乱体でのプロファイル測定に加えて、チャンバの上流 250 mm には電離箱が取り付けられた。これにより、スペクトロメータ磁石が OFF の時には、精密なビームプロファイル測定が行えるようにした。この

電離箱は、プリント基板上のXY2方向に銅パターンで形成した電極を持ち、有感領域は16 mm×16 mmの範囲で、銅パターンのピッチは500 μmである。動作原理は、SPIC(Segmented Parallel-plate Ion Chamber) [3]と同等であり、今回の測定では、大気圧雰囲気で作動させる。ビーム上流にはステアリング電磁石が設置されており、水平方向、垂直方向にビームポジションを移動させることが出来る。電離箱では、ビームを実験標的や、散乱体にターゲティングするために必要な、ステアリング電磁石電流とビーム移動量の関係を測定するために使用する。

3.2 電離箱でのプロファイル測定

2020年5月24日に高運動量ビームライン初のビーム取り出しが行われ、まず電離箱で標的近傍のビームプロファイルが測定された。Fig. 6に電離箱で測定されたFirst shotのビームプロファイルを示す。この様子は、標的チェンバーに取り付けられた蛍光板でも確認された(Fig. 7)。3.1で紹介した通り、散乱体での測定では、上流のステアリング電磁石の電流値と二次粒子増減の関係性のみが測定可能であるため、ビームポジションに対するビーム分布を正しく測定するためには、予めステアリング電磁石電流値とビームポジションの関係性を測定しておく必要があった。Fig. 8に電離箱で測定されたステアリング電磁石電流値とビームポジションの関係性を示す。電流値を上げるに従い、ビームポジションも正の値に線形的に移動していることが分かる。測定の結果、ビームの移動量の移動に必要な電流値は、水平方向： $51.6 \pm 2.8 \text{ A}/1 \text{ mm}$ 、鉛直方向： $15.1 \pm 2.3 \text{ A}/1 \text{ mm}$ と計算された。

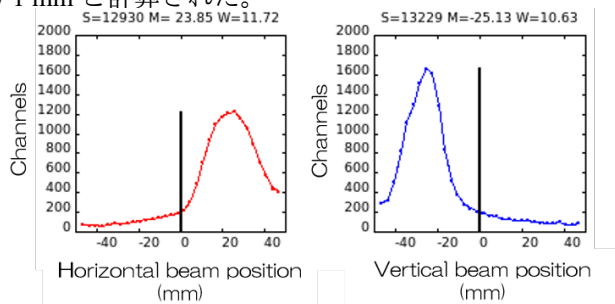


Figure 6: Beam profiles at the first extraction shot to the High-momentum beamline measured by the ionization chamber.

3.3 実験標的へのターゲティング

実験標的へのターゲティングも3.1で紹介した測定システムを用いて行われた。ステアリング電磁石によって、ビーム軌道が実験標的の中心を通るように調整する。ビームの一部が実験標的に当たり始めると、下流のIMでの二次粒子計数が増加する。標的幅は10 mmであり、ビームの設計幅 $\sigma = 1.5 \text{ mm}$ と比べると十分広いため、ビーム軌道が標的中心付近を通る時には、ビームの大部分が実験標的を通過すると考えられた。Fig. 9に標的ターゲティングでのビーム総量に対するIMで計測された二次粒子数を示す。ステアリング電磁石電流値を増加させるの

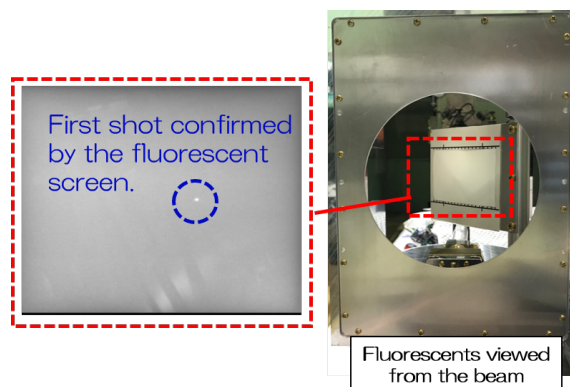


Figure 7: First shot monitored by a fluorescent plate attached to the target chamber.

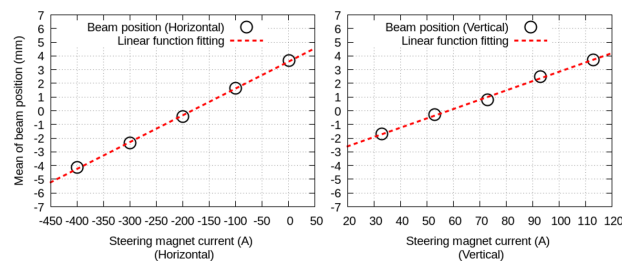


Figure 8: The horizontal beam profile as a function of the magnet current measured by the interaction monitor with scatterer.

に伴い、IMでカウントされた二次粒子数が増加し、300 A~600 A付近では、ほぼフラットな値を示した。これは、ビーム幅が標的幅に対して十分小さいため、ビームポジションが移動しても、実験標的を通過する粒子数はほとんど変わっていないことを意味している。この結果から、標的中心にビーム軌道を合わせるために必要な電磁石電流値が分かる。加えて、ビーム中心に対して対称なビーム分布を持つと仮定した場合、ビームの半数が標的に当たったときには、IMでカウントされる二次粒子数は半分になると予想される。二次粒子数のカウントがちょうど1/2となるステアリング電磁石電流値が実験標的の幅10 mmに相当し、Fig. 9に示した結果から、ステアリング電磁石電流値とビーム移動量の関係は、水平方向で50 A/1 mmと分かる。この値は、3.2での結果と1σ以内で一致している。

3.4 ビームプロファイル測定

実験に用いるビームの最終的な調整は、散乱体を用いて行われた。Fig. 3に示したように、ビームが散乱体を横切るように移動することで、下流で二次粒子が増減する。この増減からビーム分布を測定する。Fig. 10に測定されたビーム総量に対するIMで計測された二次粒子数を示す。この結果に対し、Fig. 8で得られたステアリング電磁石電流とビーム移動量の関係性を用いて、Fig. 8の横軸を距離に変換し、ビーム分布を求めた。その結果をFig. 11に示す。水平方向、鉛直方向ともに、おおよそ正規分布に近いビーム分布であることが分かる。測定データを正規分布

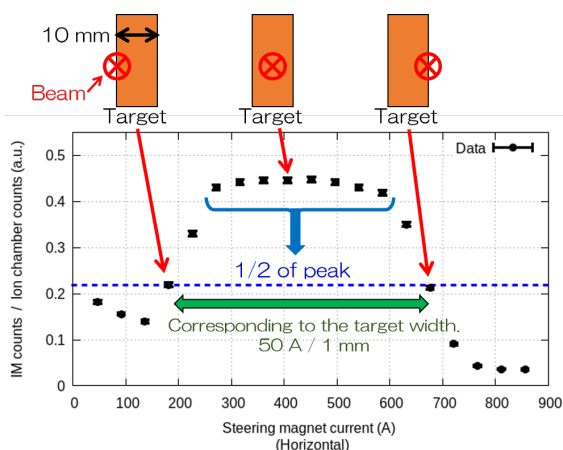


Figure 9: Targeting to experiment targets. The steering magnet current required to align the beam orbit with the target center is determined. In addition, The horizontal beam profile as a function of the magnet current measured by the interaction monitor with experiment targets.

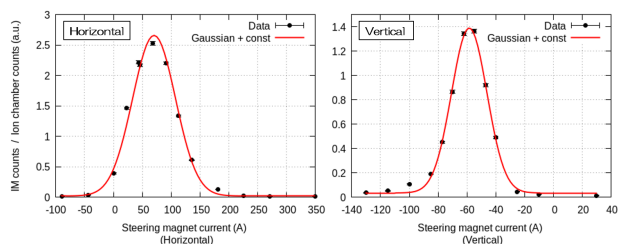


Figure 10: The beam profiles as a function of the magnet currents measured by the interaction monitor with the scatterers shown in Fig. 3.

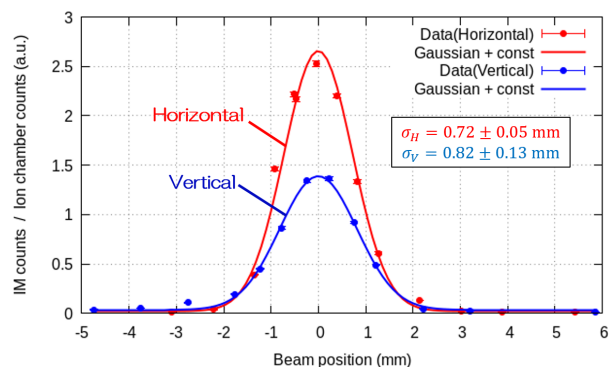


Figure 11: The final result of the beam profiles at the target. The beam position were scaled from the magnet current using calibration data as shown in the Fig. 8.

でフィットし、それぞれ、 $\sigma_H = 0.72 \pm 0.05$ mm、 $\sigma_V = 0.82 \pm 0.13$ mm と分かった。これにより、チューニング後のビーム幅が、目標ビーム幅 $\sigma = 1.5$ mm より十分細く、実験に使用出来る水準を達成していることが確かめられた。

4. 総括

J-PARC ハドロン実験施設に高運動量ビームラインが新設され、2020年5月に初のビーム取り出しに成功した。このビームラインで最初に行われるE16実験の標的チェンバーを開発した。標的チェンバーへの要求仕様として、(1) 強磁場中で使用できること、(2) Heを密封出来る気密性を備え、外部から標的を切替られること、(3) 低物質量子部品（アルミニウム、樹脂、マイラー等）で構成されること、(4) 双極磁石中に納まる寸法で、蛍光板モニターの視線が確保出来ることが求められ、これらを全て満たすように設計した。高運動量ビームラインの初のビームコミッションングでビームプロファイルを測定し、飛跡検出器へのノイズ低減のため、最もビーム幅を精密に管理する必要のある標的近傍でのビーム幅が、 $\sigma_H = 0.72 \pm 0.05$ mm、 $\sigma_V = 0.82 \pm 0.13$ mmであることを確認し、目標ビーム幅 $\sigma = 1.5$ mm より十分細く、実験に供給できる水準を満たしていることを確認出来た。

謝辞

標的チェンバーの製作、ビームタイム中のメンテナンスにおいては、京都大学の足利紗希子さん、市川真也さん、中須賀さとみさん、成木恵さん、理研の菅野光輝さんのご協力、助言により滞りなく進めることが出来ました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 小松 雄哉, “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ンング”, 日本加速器学会 THPP17 (2020).
- [2] S. Ashikaga *et al.*, “Measurement of Vector Meson Mass in Nuclear Matter at J-PARC”, Published in: JPS Conf.Proc. 26 (2019) 024005.
- [3] K.H. Tanaka *et al.*, “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), p145-p159.