

高運動量二次粒子ビームライン( $\pi 20$ )へ向けたテスト実験

## 1. ハドロンの分光研究

J-PARC ハドロン実験施設では物質の起源と進化の解明を目指し、フレーバー物理やハドロン物理、ストレンジネス核物理といった様々な階層に渡る研究を推進している。その柱の1つであるハドロン物理の目標は、物質の素になっている素粒子(クォーク・グルーオン)から、どのようにハドロンが作られているかを解明することである。ハドロンはクォークや反クォーク、グルーオンが強い相互作用で結合した粒子の総称である。ハドロンはクォーク3つからなるバリオンと、クォークと反クォークからなるメソン(中間子)に大別される。クォークはハドロン内部に閉じ込められていて単独で取り出せないため、ハドロン内部のクォークの振る舞いを知るには、ハドロンをエネルギーの最も低い状態(基底状態)から励起させて、その励起状態の性質を調べるハドロン分光の手法を用いる。ハドロンの基底・励起状態の性質には系統性を見出すことができ、その内部構造を記述する有効な内部自由度の存在が示唆されている。励起状態の研究の進展によって、クォークの数が4つや5つからなる状態と示唆される新発見のハドロンが多数発見されている[1-2]が、それらの励起構造を創り出す内部のクォークの振る舞いの解明が課題となっている。ハドロンの内部構造の解明を目指し、我々はJ-PARCの大強度ハドロンビームを用いた分光実験を推進している。

ハドロン励起構造を創り出す内部のクォークの振る舞いである「ダイクォーク相関」の解明を目指し、チャームバリオンの分光実験(E50 実験[3])が提案され、その実現に向けた研究活動が行われている。2つのクォークの相関であるダイクォーク相関は長年議論されているが、その存在は明らかになっていない。バリオンを構成している3つのクォークの1つを重いチャームクォークに置き換えることで、バリオンの残り2つのクォークの運動が分離し、励起状態に軽い2つのクォークの運動であるダイクォーク相関を反映した状態が現れると考えられている。20 GeV/cの大強度 $\pi$ ビームを用いた $\pi^- p \rightarrow Y_c^+ D^{*-}$ 反応によってチャームバリオンの励起状態( $Y_c^+$ )を生成し、欠損質量法で生成断面積を測定する。図1(左)に示すMARQスペクトロメータによって、 $D^*$ 崩壊からの終状態の粒子

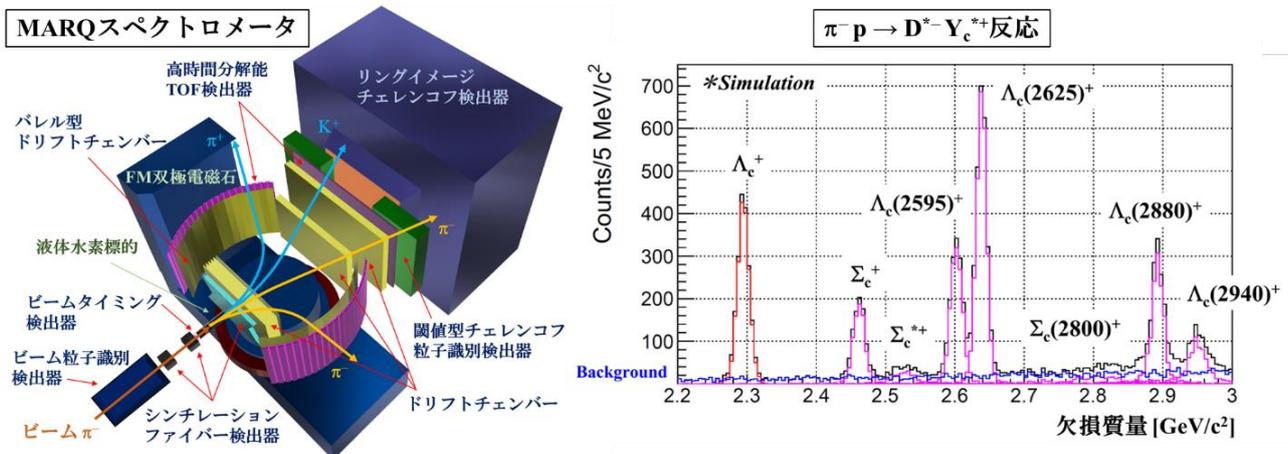


図1: MARQスペクトロメータ(左)。チャームバリオン質量スペクトル(予想)(右)。

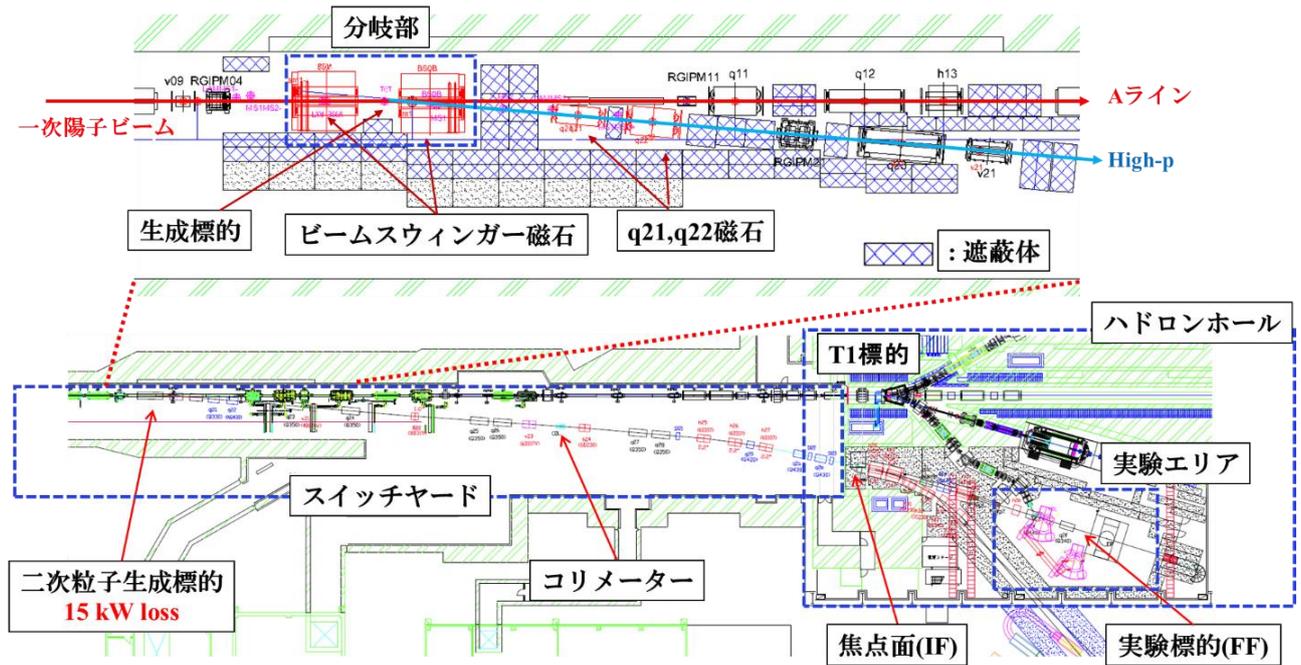


図2:  $\pi 20$ のレイアウトと分岐部のクローズアップ。

の運動量測定と粒子識別を行い  $Y_c^{*+}$ の質量スペクトルを得る。生成断面積は生成する  $Y_c^{*+}$ の内部構造(スピン・パリティ状態)に依存し、図 1(右)のスペクトルに示されるようにダイクォーク相関を反映して、基底状態の $\Lambda_c^+$ と励起状態の生成率が顕著に異なると予想されている。E50 実験によって、生成反応によるユニークなアプローチからバリオン内部のダイクォーク相関の解明を目指す。

## 2. 高運動量二次粒子ビームライン: $\pi 20$

2020年初頭に完成した高運動量ビームライン(High-p)は、既存の一次陽子ビームライン(Aライン)から一次陽子ビームのごく一部を取り出して、直接使用する形で運転されている。High-pは、Aラインからの分岐点に生成標的を設置することで、二次粒子ビームを供給できるようにデザインされている。この二次粒子化したHigh-pビームラインを「 $\pi 20$ 」と呼ぶ。図2は $\pi 20$ の全体のレイアウトと分岐部をクローズアップしたものである。生成標的におけるビームロス量は最大15 kWを計画しており、現在のT1標的と同様なHeガスを循環させた容器に標的システムをインストールする。二次粒子の生成においては、ビームスウィンガー磁石を用いて粒子の生成量が最大となる0度の取り出し角度で $\pi 20$ ビームラインに供給するように最適化されている。期待されるビーム強度は $\pi^\pm$ 中間子や陽子において数10 M/spill (spill: 2.0秒間の取り出し)である。ビームラインには粒子分別機能がないため、ビームには多数の $\pi$ にK中間子や反陽子が1-2%の割合いで混在する。実験ではこれらの二次粒子を粒子識別検出器によって識別して、異なるビーム粒子を利用した実験も行うことができる。二次粒子ビームは、 $\pi 20$ ビームラインの四重極電磁石の最初のダブレットで収集された後、生成標的の50 m下流に設置されたコリメーターで収束することで、生成標的でのビームイメージを再定義する。コリメーターの後、ビームは再び大きな分散を持つ焦点面(IF)に集束される。このとき、ビームライン磁石によって主要な幾何学収差と色収差は2次のオーダーまで除去/最小化される。IFにおけるビーム粒子の運動量(分散  $dp/p$ )と水平位置(x)の相関から、二次ビームの運動量を測定できるようにデザインされており、ビーム粒子を空間分解能1 mm( $\sigma$ )で測定することで、0.1%( $\sigma$ )の運動量

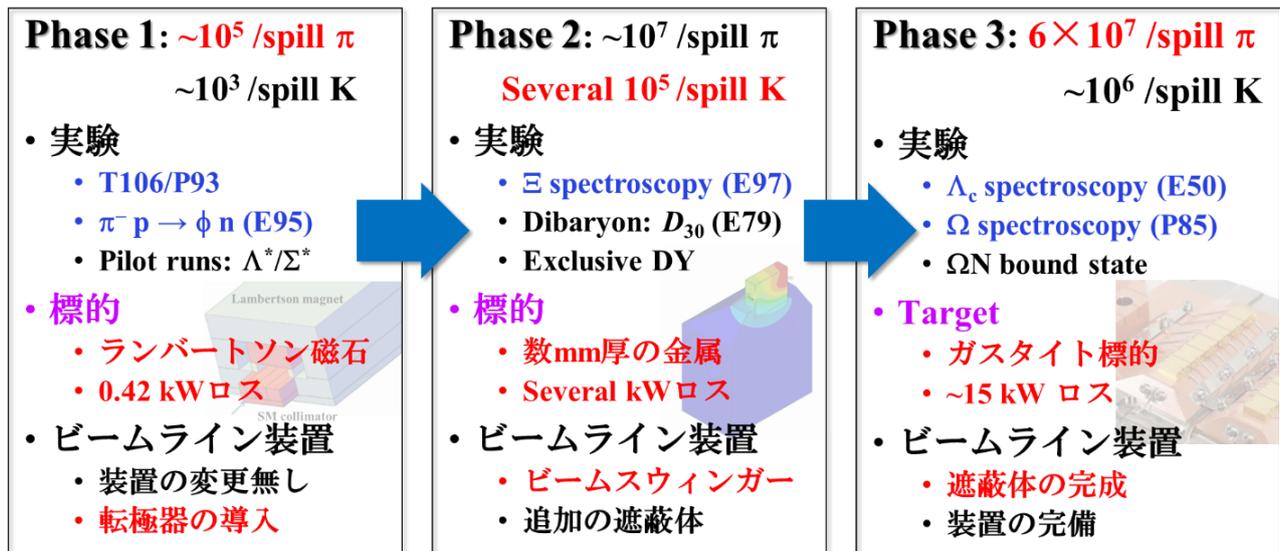


図3:  $\pi 20$ 建設のステージング案。

分解能が得られる。二次粒子ビームは実験標的位置(FF)に輸送され、FFにおけるビームの水平分布と垂直分布、およびビームライン方向に対する入射角分布は、シミュレーションからそれぞれ位置分布で約 20 mm( $\sigma$ )、角度分布で約 10 mrad( $\sigma$ )と見積もられている。

この $\pi 20$ 実現に向けたステージング案が計画されている。ステージング案では、標的におけるビームロス量を増やしながら、プロポーザルが提案されているいくつかの実験を順に遂行し、最終的にフルの $\pi 20$ ビームラインを実現してE50実験を実施する計画である。3つのステージが計画され、それらは、(1) 現状のビームライン構成要素と遮蔽体を変更無しに二次粒子ビームを取り出すフェーズ1、(2) 数 kWの低ロス標的とビームスウィンガー磁石を導入して大強度二次粒子ビームの利用を目指すフェーズ2、(3) 15 kWの生成標的と遮蔽体を完備して、E50実験を実施するフェーズ3、である。図3は、このステージング案と、各ステージにおけるビーム強度と実施実験をまとめたものである。各ステージにおけるビームラインの性能や装置は、全体の目標であるハドロンの内部構造の解明を目指す実験が各ステージにおいて実施可能となるように設定している。

### 3. T106テスト実験

現在の High-p ビームラインは、Aラインとの分岐部に設置したランバートソン電磁石(LM磁石)によって 30 GeVの一次陽子ビームの一部を図4に示す取り出し方法で切り出してユーザーへ供給している。この運転では数百ワットの一次陽子ビームがLM磁石の取り出し部分に衝突するため、LM磁石でのビームロスで二次粒子が生成されることが予想される。一次陽子ビームの取り出しではLM磁石のギャップに磁場をかけることで、High-pビームラインへ陽子ビームを輸送する。一方で、このLM磁石の電場をオフにすることで、衝突している一部の一次陽子ビームから生成した二次粒子のみをHigh-pビームラインに送ることができる(図4)。今回、LM磁石において生成された二次粒子をHigh-pビームラインを通して測定するT106テスト実験[4]が提案され、2025年1月のビームタイム(Run 92)において二次粒子の測定が初めて行われた。この測定は前節で説明した $\pi 20$ のステージング案におけるフェーズ1の最初のステップとなる。現在はビームライン磁石電源に転極器が無いため、実験では正電荷粒子のみの測定を行った。測定を行った運動量は3, 5, 10 GeV/cである。

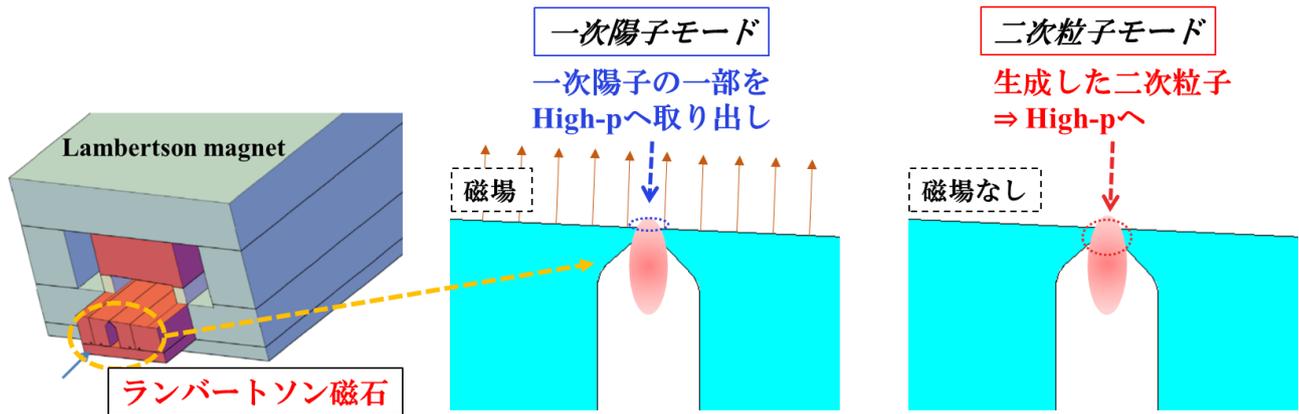


図4: T106実験における二次粒子の生成と取り出し方法。

LM 磁石でのビームロス量の算出には、LM 磁石周辺のロスモニターの較正が必要である。ビームロス量の算出精度を上げるために、Run 92 のビームタイムの初期に 5 kW の加速器運転をリクエストして行った。低強度ビームを利用することで、許容ビームロス量の範囲内でより一次陽子ビームを LM 磁石に近づけることができ、一次陽子ビームのプロファイルモニターで測定が可能なビームの芯に近い部分が LM 磁石に当たり、ビームのうち何%がロスしたかが分かる(図 5)。この時、ビームの分布をガウス分布と仮定して計算すると、例えば 5 kW の際に  $2\sigma$  部分(全体の 2.5%に相当)が当たると推定ビームロス量が 125 W、 $1.6\sigma$ 部分(全体の 5%に相当)だと 250 W の推定ビームロス量となる。このような手法で、一次陽子ビームの位置を微調しながらロスモニターの応答を測定し、ロスモニターの計数率とビームロス量の対応関係を求めて推定ビームロス量を算出した。T106 実験では、ビームロス量の算出に用いるプロファイルモニターの位置情報とロスモニターの計数率のデータを系統的に取得した。今後、このデータを使用して詳細に解析する予定である。その後 T106 実験の測定は、83 kW 運転におけるロスモニターの値と較正で得られたビームロス量との対応関係を使って算出した約 230W の推定ビームロス量で実施した。

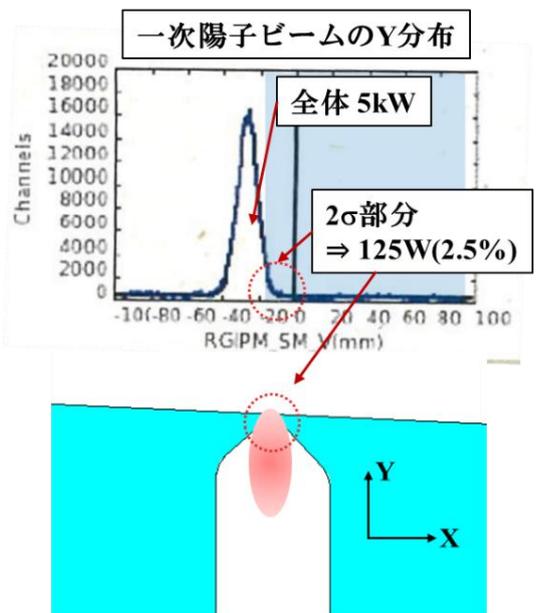


図5: ロスモニターの較正方法。

図 6 は High-p 最下流の磁石の下流に設置した T106 実験セットアップの写真である。十分な時間分解能を得るために蛍光板(シンチレーター)の両端に光電子増倍管を取り付けた T1 と T2 のいわゆるタイミング検出器を設置し、T1 と T2 が同時に粒子を検出する事象の単位時間当たりの数を二次粒子の計数率とした。T1 と T2 の間には $\phi 0.5$  mm のシンチレーションファイバー(蛍光を発するファイバー)レイヤー3 層(X: $0^\circ$  , UV: $\pm 30^\circ$  )で構成されるファイバー飛跡検出器(BFT1,2)を 2 台設置して飛跡を検出して、二次粒子の分布を測定した。T2 の下流には粒子識別検出器(リングイメージングチェレンコフ検出器)を設置し、粒子識別のための分解能を向上するためのファイバー飛跡検出器(BFT3)がその下流にある。屈折率 1.007 の特殊な物質(エアロゲル)を用いた検出器(閾値型エアロゲル検出器)も粒子識別の性能向上のために設置した。 $\mu$ 粒子測定用の検出器として、それぞれ 100 mm

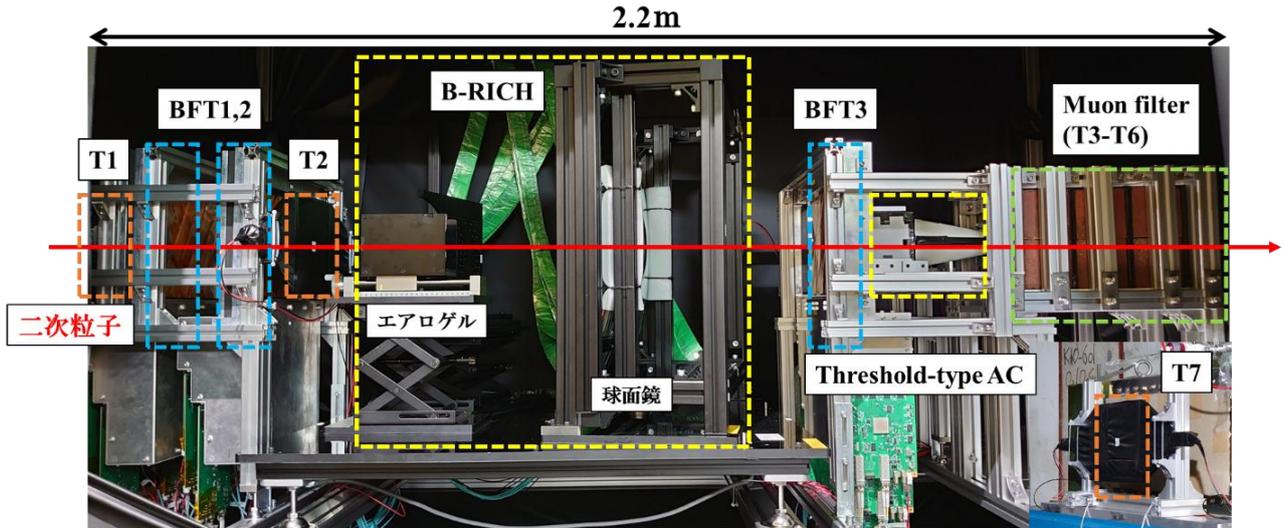


図6: T106実験セットアップの写真。

厚の鉄ブロックを間に置いた4枚の蛍光板によるタイミング検出器(T3-T6)を設置した。これはミュオン透過力が高いことを利用したミュオン弁別検出器である。実験エリアの最下流となるビームダンプの直前にもタイミング検出器(T7)を設置し、長尺の飛行時間測定も行った。信号の読み出しには、2024年6月にJ-PARCハドロン実験施設において実施したT103テスト実験[5]によって確立した連続読み出しデータ収集システムを用いた。

実験では、ビームラインを構成する20台の磁石の磁場設定のチューニングを行い、取り出される二次粒子の計数率が最大となるように調整した。調整後に得られた二次粒子の計数率を表1に示す。図7(左)は5 GeV/cの運動量設定で得られた実験標的位置(FF)における二次粒子の水平(x)、垂直(y)方向の分布と、それらの角度分布(dx/dz, dy/dz)である。FFにおける水平分布と垂直分布、およびビームライン方向に対する入射角分布は、それぞれ位置分布で約10 mm( $\sigma$ )、角度分布で約4 mrad( $\sigma$ )であった。図7(右)はリングイメージングチェレンコフ検出器で得られたビーム粒子のチェレンコフリングイメージである。10 GeV/c設定で、陽子のリングイメージが鮮明に観測できた。 $\pi^+$ のリングイメ

表1: ビームライン調整後に得られた各運動量設定での二次粒子の計数率。

運動量 [GeV/c]	3	5	10
計数率 [M/spill]	0.2	0.6	1.4

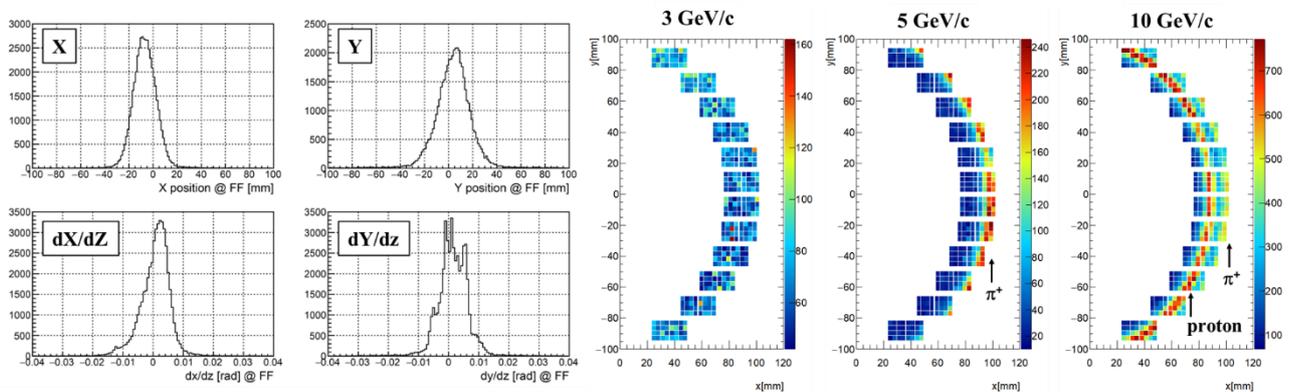


図7: FFにおけるプロファイル(左)。リングイメージングチェレンコフ検出器で得られたリングイメージ。5 GeV/cの $K^+$ と10 GeV/cの陽子のリングはほぼ同じ位置となる(右)。

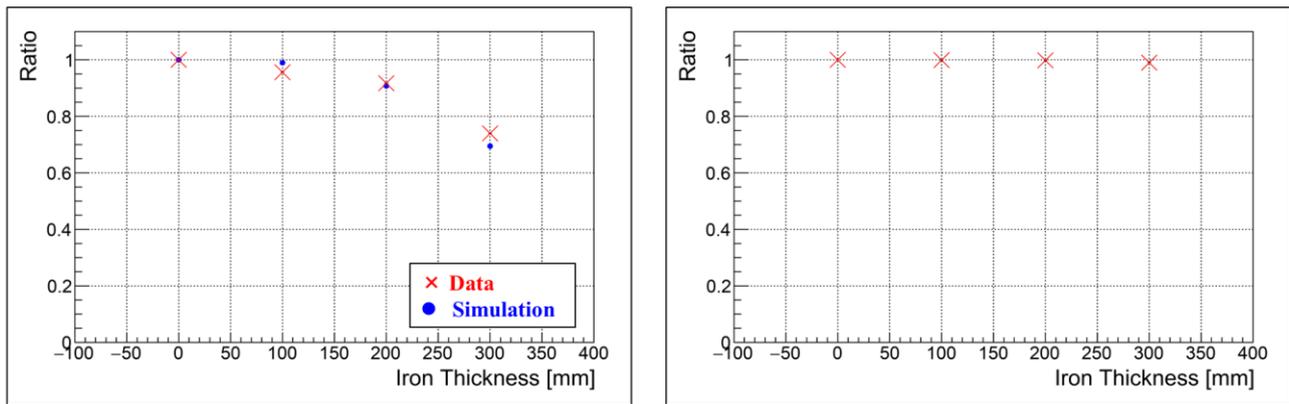


図8: Muon filterの応答。(左) 5 GeV/cの $\pi$ 20モードでの実測データとシミュレーションとの比較。(右) 60%の $\mu$ 20モード(3 GeV/cの運動量)におけるデータ。

ージはヒットパターンの右端に位置するように検出面を設置している。 $K^+$ の混入量は 3 GeV/c では約 1/1000、5 GeV/c と 10 GeV/c では 1/100 と見積もられるため、単純なヒットパターンでは信号がノイズに埋もれてしまう(S/Nが悪い)ため、リングイメージを観測することが困難であると考えられる。今後、“Global approach”[6]と呼ばれる解析方法を用いて  $K^+$ の比率を求める予定である。閾値型エアロゲル検出器を用いた実験中のオンライン解析では $\pi^+$ 中間子と陽子の比率は約 1:1 であった。実験では、ビームラインの性能に関わる測定の他に、オペレーションに関するものとして、A ラインとの同時運転が問題無く実施できたことや LM 磁石におけるビームロスの安定性を確認できた。

#### 4. $\mu$ 粒子測定実験

T106 テスト実験においては、二次粒子測定で調整したビームライン磁石の設定パラメータ( $\pi$ 20 モード)を元に、二次粒子である  $\pi$  中間子が崩壊して得られる三次ミュオン( $\mu$ 粒子)を取り出す運転モード( $\mu$ 20 モード)の試験も実施した。 $\mu$ 20 モードは図 2 に示すコリメーターの前後の領域を崩壊ボリュームとして使い、コリメーターから上流部の磁石の運動量設定に対して、下流部の磁石を 60%~85%の低い値に設定変更する。このようにすることで、二次 $\pi$ 中間子が崩壊する際に重心系で後方に出る三次 $\mu$ 粒子を集めてくることができ、かつ元の二次 $\pi$ 中間子をスイープすることで、高純度の $\mu$ 粒子を取り出せる。例えば、上流部の運動量設定に対して、下流部を 60%の値に設定することは、重心系で後方 180 度方向に出る $\mu$ 粒子を集めてくることに対応する。この $\mu$ 20 モードが実際に上手く動作するか否かを検証した。実験では、3, 5, 10 GeV/c のそれぞれの運動量に対して、60%, 75%, 80%, 85%の計 4 つの下流部の磁石の設定変更を試験した。図 8 は、5 GeV/c 設定での $\pi$ 20 モードと、 $\mu$ 20 モードにおいて下流部を 60%に設定したときの、ミュオン弁別検出器の応答を示している。T3(0 mm の位置)での係数を 1 に規格化して、下流の厚さ各 100 mm の鉄ブロックを通過した粒子の減衰の割合を示している。 $\pi$ 20 モードでは鉄が厚くなるにつれて二次粒子が減衰する様子が観測できるが、60%の $\mu$ 20 モードにおいてはほぼ減衰していない。 $\pi$ 20 モードのデータ点にはシミュレーションの結果を載せており、減衰の傾向はほぼ再現できている。5 GeV/c における各 $\mu$ 20 モードのデータとシミュレーションを用いて求めた $\mu$ 粒子の純度とそれ以外の二次粒子の混入率を図 9 に示す。80%以下の設定において純度 90%以上が得られており、60%では約 99%の純度であることが分かった。測定で得られた三次 $\mu$ 粒子の計数率を表 2 に示す。

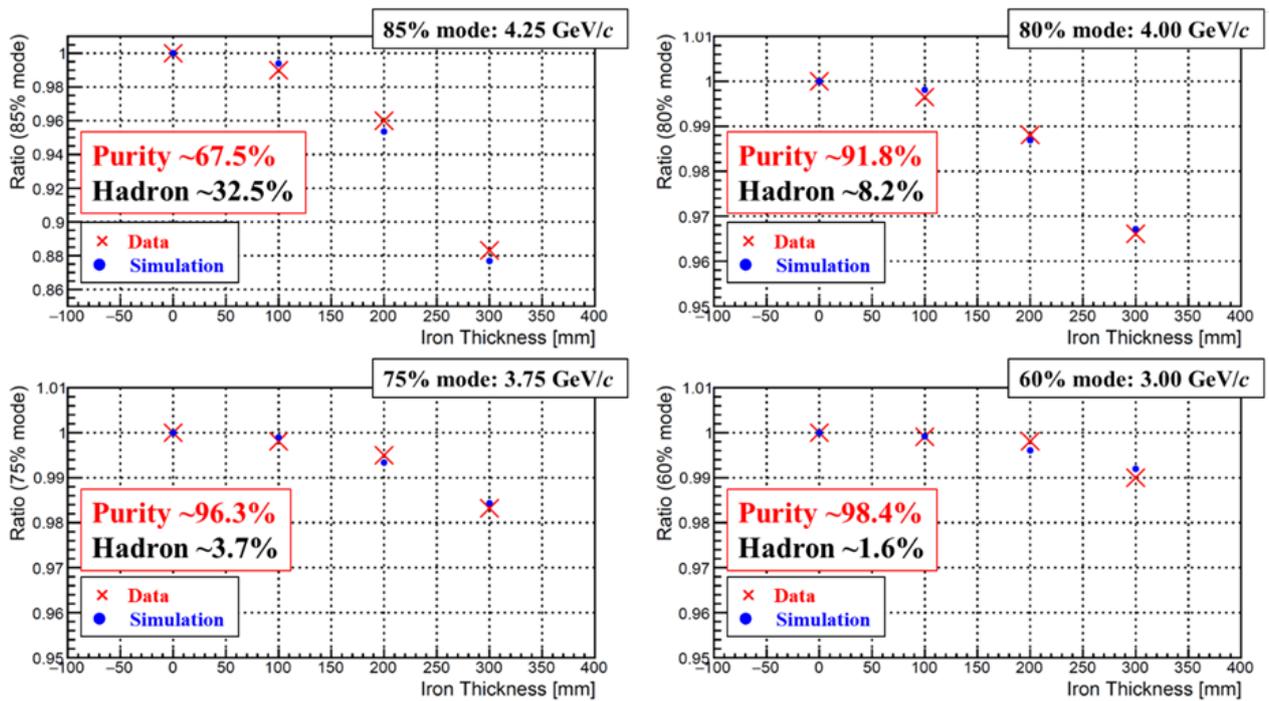


図9: 5 GeV/cの各 $\mu 20$ モードにおける $\mu$ 粒子の純度とそれ以外(Hadron)の混入率。

表 2: ビームライン調整後に得られた各 $\mu 20$ モードでの粒子の計数率。

[k/spill]	$\pi 20$ モード	60%モード	75%モード	80%モード	85%モード
3 GeV/c	200	0.42	0.64	1.0	2.0
5 GeV/c	600	1.7	2.6	3.7	8.3
10 GeV/c	1400	2.4	4.6	6.6	17.0

## 5. まとめと今後の展望

High-p ビームラインにおいて分岐部の LM 磁石で生成される二次粒子を測定するテスト実験 (T106) では、2025 年 1 月のビームタイムにおいて二次粒子の測定に初めて成功した。実験で得られたビームロスの情報や、実際に取り出された二次粒子の計数率やプロファイル、粒子の種類割合等を精査し、今後の $\pi 20$ へのアップグレード計画をより着実なものにしていく予定である。加えて、三次 $\mu$ 粒子を取り出す運転モードの試験も実施し、高純度の高運動量 $\mu$ 粒子の取り出しにも成功し、J-PARCにおける新たな高運動量の $\mu$ 粒子源を開拓した。2026年度の後半までに転極器の設置[7]が完了するため、次回は負電荷二次粒子の測定実験が提案される計画である。加えて、 $\mu$ 粒子については、比較的大きな物体(コンクリート内部に鉄骨が入っているもの)などを利用したイメージング実験の計画を立案している段階であり、今後のビームタイムにおいて実証試験が提案される計画である。T106 実験において最初の二次粒子測定が完遂でき、 $\pi 20$ の建設と今後のハドロンの内部構造の解明を目指す実験の実施に対しての大きなステップとなったと言えよう。

## Reference

- [1] A. Hosaka *et al.*, “Exotic hadrons with heavy flavors: X,Y,Z and related states”, PTEP 2016, 062C0 (2016).
- [2] S. K. Choi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (2003)., R. Aaij *et al.*, Phys. Rev. Lett. 121, 162002 (2018).
- [3] H. Noumi *et al.*, J-PARC Proposal E50, “Charmed Baryon Spectroscopy via the ( $\pi$ ,  $D^{*-}$ ) reaction” (2012).
- [4] K. Shirotori et al., J-PARC proposal T106, “Proposal for the first stage of the P93 experiment (Evaluation of the performance of the secondary beam at the high-momentum beam line)” (2024).
- [5] K. Shirotori *et al.*, J-PARC proposal T103, “Proposal for a test experiment to evaluate the performance of the trigger-less data-streaming type data acquisition system” (2024).
- [6] R. W. Forty and O. Schneider, “RICH pattern recognition,” CERN, Geneva, Tech. Rep., 1998. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/684714> (cit. on pp. 66, 69).
- [7] JST K-program (JPMJKP24J3)