

J-PARC ハドロン施設の現状報告

J-PARC ハドロン実験施設の現状を報告する。特に、今回の報告では、新設した一次陽子ビームラインについて、取り上げて報告する。

J-PARC ハドロン実験施設の現況

J-PARC ハドロン実験施設では、加速器の長期シャットダウンにあわせ様々な改良工事・実験装置の建設が進められている。

荷電 K 中間子のビームラインである K1.8 においては、ストレンジクォークを 2 個含んだバリオンの原子核束縛状態を高精度・高統計で研究するために、新たな実験装置の導入が続いている。これは、新設の電磁石に設置を含む大規模なものである。

もう一つの荷電 K 中間子のビームラインである K1.8BR ビームラインでは、現行の実験装置のメンテナンスを進めつつ、次期計画であるソレノイド磁石と検出器の設計・建設が始まろうとしている。

中性 K 中間子のビームラインでは、K 中間子稀崩壊の測定のために、データ収集系の更新作業などが進められている。

さらに、ハドロン実験施設では、シャットダウン後より、ミューオンを使った COMET 実験が開始されるが、そのためのビームライン、検出器の準備が進んでいる。ビームラインは、ホール内部分の建設が終了した。

下記の新設一次陽子ビームラインでは、収集したパイロットデータの解析を進めつつ、2023 年 1 月に予定されている本格的な物理データの収集のための準備を続けている。実験装置の増強は、既に、鉛ガラス検出器の 2 モジュール追加分の設置は完了し、ガステレノコフ検出器の追加モジュールの製作・設置、シリコン検出器のアップグレードを準備している。

新設一次陽子ビームライン

これまでの J-PARC ハドロン実験施設では、加速器からの陽子ビームを金標的に照射し生成した二次粒子（主に K 中間子）を用いた素粒子・原子核実験を推進してきた。これに対して、加速器からの一次陽子を直接に物理実験に用いることが可能なビームラインと実験装置を建設し、2020 年に運用を開始した。

図 1 に、ハドロン実験施設ビームラインの概略図を示す。J-PARC 加速器（30GeV Main Ring）から取り出されたビームは約 200m 程度のビーム輸送ラインを通じてハドロン実験施設へと輸送される。この輸送ラインの途中に、従来の一次ビームライン（A ラインと呼ぶ）からの分岐として新たに一次陽子ビームライン（B ラインと呼ぶ）を新設した。分岐部の電

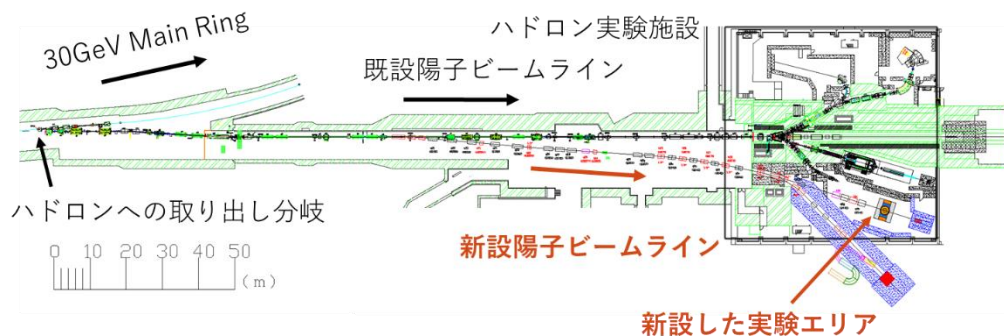


図 1：ハドロン実験施設ビームラインの概略

磁石を含む新設ビームラインの電磁石、真空系、モニター、インターロックは、鉄の再利用など過去の資産を最大限活用しつつ、新規に製作設置された。

図 2 に、製作した分岐電磁石の写真を示す。写真の灰色に見える部分が電磁石リターンヨークの鉄で、真ん中の銅色の部分がコイルである。その下の円環状のものが真空パイプのフランジで、その中をビームが通過する。写真を良く見ると、フランジ内の下側にホームベース状の空間があることが分かる。このホームベース空間は電磁石の鉄芯に穴が明けられた構造となっている。そのため、この空間には磁場がほぼ存在しない。コイルによる磁場は、このホームベース空間の上部にあるギャップ部分に存在する。このような構成を取ることで、ホームベース内を通過するビームは、影響を受けずに従来と同じ A ラインとして輸送される。ごく微量 (0.1%程度) のビームが上部ギャップ内を通過し、B ラインに曲げられ、新設ビームラインに輸送される。このような微量ビームでも、 1×10^{10} protons per spill 程度のビーム量となり、直接に実験に用いるためには、十分に高強度となる。



図 2：分岐電磁石の写真

2020 年のビーム調整開始時にビームのプロファイルなどの各種のビーム性能を測定した。右図に、水平方向のプロファイル測定結果を示す。実験標的の設置位置と同じ場所に散乱体を用意し、ビームの位置を左右に動かし、散乱粒子の数を簡単な測定器により測定した。得られたビーム中は、事前に光学系より評価した予想値と一致した。ビームは、ほぼ想定どおりに輸送されていることが分かった。

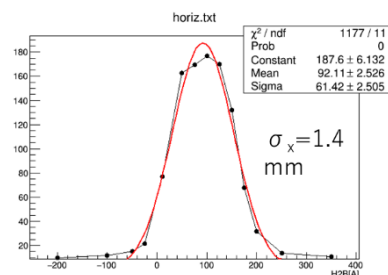


図 3：粒子の散乱により測定したビームプロファイル

ベクター中間子質量分布の測定実験とパイロットデータの収集

新設した一次陽子ビームラインで実施されるのが、原子核中でのベクター中間子の質量分布の測定実験である。この実験は、陽子や中性子などのハドロンが持つ質量の獲得過程に関する研究である。陽子や中性子は、内部に 3 個のクォークが存在することが知られているが、その質量は、クォークの裸の質量と比較すると 100 倍程度重く、この質量差は、強い相互作用の持つ対称性の自発的な破れにより説明される。そこで、原子核などの有限密度媒質中では、この対称性が部分的に回復し、ハドロンの質量が変化する可能性が理論的に指摘されている。そこで、この原子核中でのハドロン質量の変化を測定しようとしているのが、現在、進行中の実験である。

実験は、陽子ビームを原子核標的に照射し、生成したベクター中間子の質量分布を電子陽電子対用崩壊を用いて測定する。ベクター中間子を用いるのは、対称性の回復による質量変化に敏感なプローブとなるからである。ベクター中間子の質量は崩壊粒子の運動量から再構成されるが、運動量を高精度で測定するためには、薄い標的を使用する必要がある。そこで、十分な統計を得るために高輝度ビームを用いる。ビームライン建設と並行して、実験エリアに検出器が製作された。図 4 に実験用の電磁石と製作した検出器の写真を示す。写真のオレンジ色で塗られた部分が、電磁石の磁心にあたる部分である。ビームは、写真の銀色のパイプ中を輸送され磁石の真ん中に設置された原子核標的に照射される。

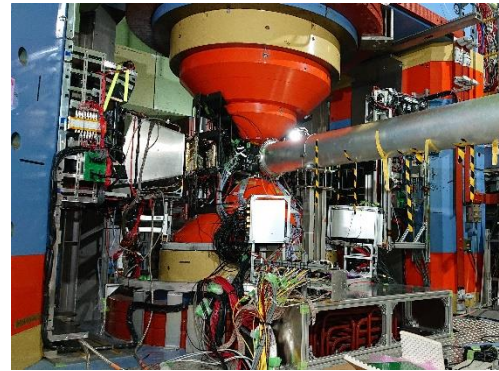


図 4：建設した検出器の写真

検出器は、運動量測定を実施する飛跡測定装置と電子・陽電子の識別装置から構成される。運動量は、磁場中での粒子の飛跡（曲率）から測定されるため、粒子の飛跡を高精度で測定することが必要とされる。この実験では、シリコン半導体検出器と Gas Electron Multiplier (GEM) を用いた GEM 飛跡検出器の 2 種類の検出器が用いられている。GEM 飛跡検出器は、理研・東大との協力で GEM フォイルなどの検出器の基本部品から開発したものである。電子・陽電子識別装置としては、2 種類の検出器が使用される。一つは、GEM を用いた大立体角のガステレンコフ検出器であり、もう一つは、電磁シャワーを用いて電子・陽電子を識別する鉛ガラス検出器である。

2020年から始まったビーム調整に続き、2020年と2021年にパイロットデータを収集した。検出器の性能評価のためのパイロットデータの解析で得られた結果をいくつか紹介する。図5に、飛跡の再構成により得られた標的分布とガスチェレンコフ検出器のヒット位置と通過飛跡の位置の差を示す。3枚の原子核標的を陽子ビームで串刺しにしているため、3個のピーク構造が見える。標的分布の幅は、位置検出器の測定精度が反映されており、事前に想定した理想値には、まだ達成していないが、較正作業を続けている。ガスチェレンコフ検出器のヒット位置と通過飛跡の位置の差の中は、十分に細く、ガスチェレンコフ検出器の読み出し電極パッドの幅と一致する。

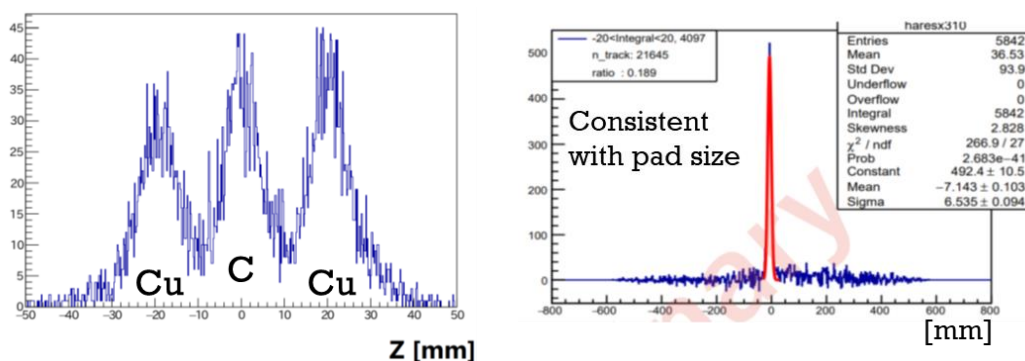


図5：(左) 再構成された標的分布、(右) ガスチェレンコフ検出器の読み出し信号位置と通過飛跡の位置の差

次に、電子・陽電子識別用検出器で得られている信号分布を図6に示す。ガスチェレンコフ検出器の信号分布は、鉛ガラス検出器の信号を用いて電子と判定された場合の信号分布で、電子からのチェレンコフ光に相当する平均10 p.e.程度をもつ分布が得られている。試作機による評価では、11 p.e.程度を予想していたので、ほぼ想定どおりの性能が得られているが、今後、試作機での評価との差の理由を検討する。鉛ガラス検出器は、逆に、チェレンコフ光検出器で電子と同定された場合の分布(赤)を示している。参考として示している π 中間子の分布(青)に対して、信号波高の高い成分に有意な増加が見られる。

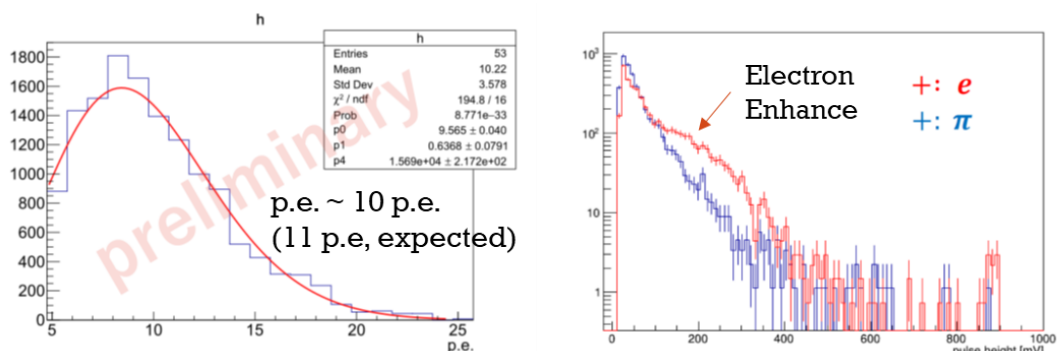


図6：(左) ガスチェレンコフ検出器で得られた光電子の分布、(右) 鉛ガラス検出器の信号波高の分布