

今年度は測定器開発センター（ITDC）の設立から3年目となる。昨年度より素核研内のエレクトロニクス、低温、メカニカルエンジニアリング各グループと一体化して活動してきたことに加え、開発プロジェクトを繋ぐ専任教員2名も加わり、グループを跨いだ共同開発も進んでいる。この中間報告では、センター主体の次世代基幹技術開発の一つであるCMOS MAPS 開発についてと本センターが大学共同利用施設として運用している測定器開発テストビームラインの運用状況、そして J-PARC ハドロンホール K1.8BR エリアでのハドロンテストビームラインに向けた粒子数計測について紹介する。エレクトロニクスグループは2024年9月[1]、低温グループについては2024年5月[2]の活動報告を参照して頂きたい。

1. CMOS MAPS の開発について

CMOS MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor)はセンサー部となるシリコンウエハー上に読み出し回路のアナログ部とデジタル部を CMOS 技術により積層した、ピクセル検出器である。従来のピクセル検出器はセンサー部と読み出し回路は別々に作り、 bumps ボンドにより接合する。この過程はかなり困難であると同時に、ピクセルサイズを小さくするにあたりボトルネックとなっていた。この MAPS により、ピクセルサイズを小さくできると同時に検出器の厚みをかなり薄くできるようになり、将来的に位置分解能 数 μm 、物質量 0.1% X_0 以下が達成できると見込んでいる。

現在はセンサー部にアバランシェ層を組み込むことで、増幅機構の導入を目指している。この手法により、アナログ回路のアンプによる利得を減らす、または取り除くことができ、消費電力の抑制と高速応答の両立を実現することを目指す。これまでに、CERN の研究者を中心としてアバランシェ層を組み込んだ MAPS の試作が行われましたが、この試作ではアバランシェ層をピクセル内の一部にしか配置しておらず、増幅される領域

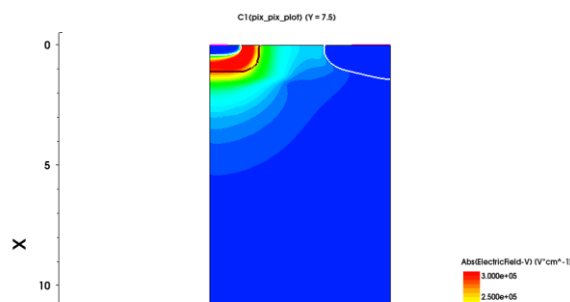


図 1: デザインしている 15 μm のピクセルサイズのアバランシェ層を持つ MAPS の電場分布 (1/2 ピクセル)。左上の青い領域が読み出し電極部分になっており、赤い領域がアバランシェ層となっている。

が限定されていました。そこで、長年 MAPS の開発を進めてきたフランスの Strasbourg 大学や CERN の研究者と協力し、図 1 に示すようなピクセル内の領域全てで増幅機構が機能する新しいピクセルの開発を目指している。2025 年 3 月にアバランシェ層を持つ MAPS の試作を実施する予定であり、その準備として岡崎が 2024 年 11 月にフランスの Strasbourg 大学に 1 週間滞在した。共通のピクセルデザインを用いたシミュレーションを通じて、センサー内部の構造(読み出し電極のサイズやアバランシェ層の深さや不純物濃度など)を調整し、最適なデザインを検討している。

また、LHC での実験用に開発されていた、アバランシェ層を持たない MAPS である MALTA-2 の性能評価を、筑波大学および KEK の EF グループと協力して実施している。図 2 に示す KEK の EF グループが保有するテレスコープに新たに MALTA-2 を 1 台追加し、2024 年 10 月に PF-AR の測定器開発テストビームラインで検出効率や位置分解能の評価を行なった。前回のビームテストで 97.5% の検出効率を達成していましたが、目標である 98.5% 以上には達していなかった。これを改善するため、MALTA-2 に搭載されている信号処理回路のシミュレーションを活用し、アンプやディスクリミネーターのパラメータを調整した。その結果、目標としていた 98.5% の検出効率を達成した。さらに、他のピクセル検出器(ピクセルサイズ $\geq 50 \mu\text{m}$)を用いて再構成したトラックを用いて MALTA-2 の位置分解能を $24 \mu\text{m}$ と評価した(図 3)。現在、シリアライザーを搭載した新型 MALTA の試作を 2025 年 3 月に予定しており、それに向けて信号処理回路のシミュレーションや性能評価に使用する新たな読み出し基板の準備を進めている。



図 2. 測定器開発テストビームラインで用いたテレスコープ

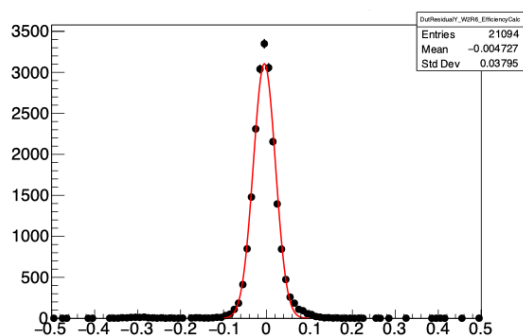


図 3. MALTA-2 で観測したヒット位置と再構成したトラックから予想されるヒット位置の残差 (mm). 赤のラインは Gaussian でのフィット。 $\sigma = 24 \mu\text{m}$ が得られた。

2. PF-AR 測定器開発テストビームラインの運用状況

加速器第 6 系の皆様の尽力により、測定器開発テストビームラインにはスケジュール通りに電子ビームが供給され、順調に運用を続けている。2024 年 10 月～12 月期は 12 実験[3]が行われた。このうち 2 実験は加速器科学インターンシップ制度を用いた学部生を中心にした実験である。ビームタイムは 10 月 21 日から 12 月 16 日の約 8 週間であったため、全 12 実験の各テスト実験がビームラインを占有できる期間を持てるようには予定を組むことができなかった。希望時期が重なった 11 月末から 12 月初めの 2 週間は、2 実験が並行して実験を行った。テスト対象の検出器にきれいな（多重散乱していない）電子ビームを照射するために、昼夜でビームタイムを分けたり、上流・下流を入れ替えるなど、テスト実験グループ間で調整してもらいながら実験を行ってもらった。

施設の運用面ではこれまで問題無く順調だったが、最後はビームシャッターの不具合が発生した。シャッターの開閉の状態にはシャッターの位置によりハード的に作動するスイッチを使用しているが、そのスイッチの不具合が起きた。応急処置により 10 月～12 月期の運転は切り抜けたが、不安定な状態である。2025 年 3 月期のビームタイム前が始まる前に部品の交換・改良により完全に修復する予定である。

電子ビームの品質向上については、テストビーム輸送の効率を上げ、ビーム中心輝度を出来るだけ高くするために、ビームプロファイル測定用の測定器を製作・導入してきた。これによるビームプロファイル測定とビーム輸送シミュレーション結果の比較からビーム輸送に関する理解を進め、電磁石運転の最適パラメータを導出した。結果、中心輝度を 2.5 倍向上させることに成功している。また、電磁石の配置を変更することで、運動量のばらつきを増やすことなく、粒子数を 2 倍程度向上できることが判明した。これを 2025 年夏のシャットダウン中に実施する予定である。この他にも PF-AR 加速器側の改良による恩恵があり、特にマルチバンチによる電流量増加により、テストビームラインのビーム供給量が増えると期待している。また、電子のトップアップ入射に伴うバースト現象の抑制にキッカーの改善が予定されている。これにより安定したビームを得ることができると見込んでいる。

3. ハドロンテストビームラインに向けた粒子数計測について

検出器開発にとってテストビームはとても強い武器であり、PF-AR からの電子を引き出す測定器開発テストビームラインが共同利用施設として運用が始められたのは、非常に意義

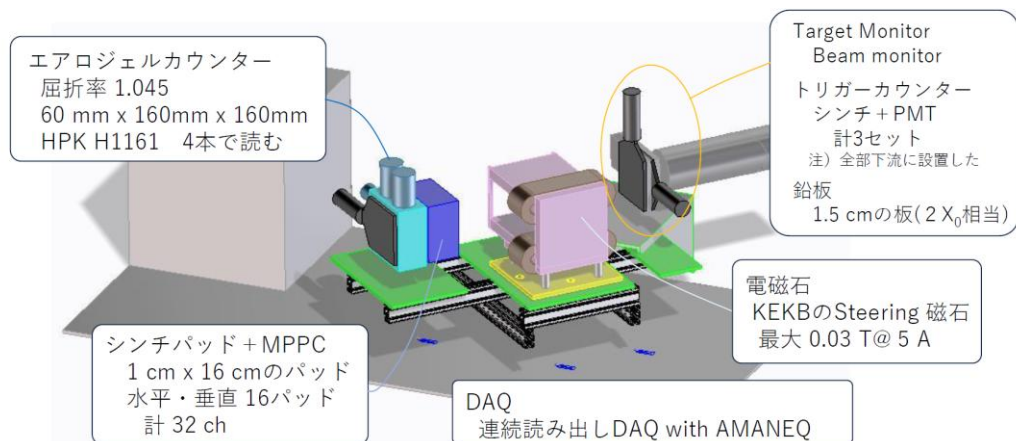


図4. T105 の実験セットアップ。粒子は右手のパイプから左手に流れる。

がある。これに加え、ハドロン粒子によるテストビームが使えるようになると、検出器開発に対し幅広い要求に応えることができるようになる。J-PARC ハドロンホールの K1.8BR エリアには、金標的から 50 度角度で設置された粒子線輸送パイプが存在する。ハドロンテストビームラインの設置を念頭に置いて、このパイプを通してどれくらいの荷電パイオンが届いているのかを測定することになった。この実験は J-PARC ハドロン施設のテスト実験として提案し、審議を経て T105 実験として進行中である。

図4に実験のセットアップを示す。ターゲットで生成されパイプを抜けてくる 2 次粒子の中で、最も多いのは低エネルギーの光子および電子である。これを止めるために厚み 1.5 cm (2 X_0 相当) の鉛板を最上流に設置する。光子から対生成した低エネルギーの電子・陽電子対を完全に除去するため、電磁石を設置した。これは KEKB で使用されていた Steering 電磁石で 5 A の電流を流すと 30 mT 程度の磁場を作ることができる。これにより 1 MeV 程度の電子であれば曲率半径 10 cm 程度になり、下流の検出器には入らなくなる。次に多い荷電粒子は陽子である。検出器のテストには 1 GeV の陽子は使いたくないので、除去したレートを測定したい。そのため、屈折率 1.045 のエアロジェルを設置、放出されるチェレンコフ光を光電子増倍管で読み出すことにした。この屈折率では運動量 3 GeV 以下の陽子は光を出さないが、500 MeV 以上の荷電パイオンまたはミューオンでは光を出す。このパイプラインには 2 GeV までの粒子しか来ないので、エアロジェルカウンターのヒットを要求することにより、陽子も排除することができる。この係数を数えれば、500 MeV 以上の荷電パイオンを中心とした粒子数が測定できる。幅 1 cm のシンチレータ・パッドを各方向 16 枚ずつ並べ、ビーム強度のプロファイルも測定できるようにしてある。シミュレーションでは 1 GeV 当たりの荷電パイオンのレートは 120 k/spill が得られると予想されている。これを実測で確認するのがこのテスト実験の目的となる。

1. ケーブル引き 2. 移設、位置決め 3. 検出器設置、ケーブル接続

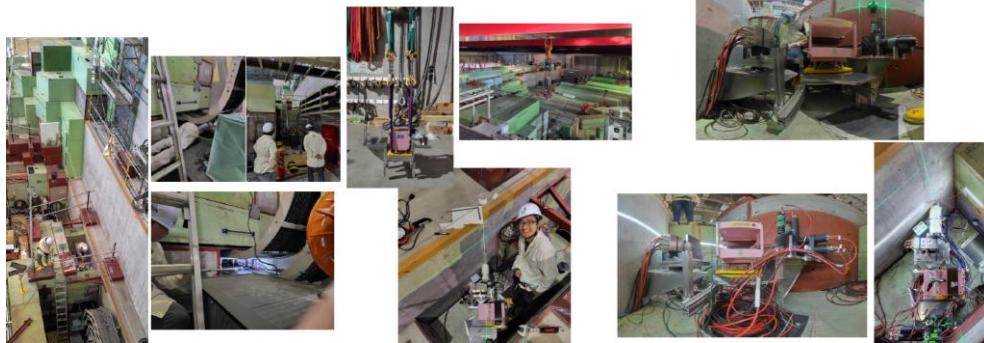


図5. 12月10日から13日に行ったシステムの導入の様子。

このセットアップの導入を12月10日～13日に行った。準備はつくばキャンパスで行っていたので、まずはJ-PARC低温グループの幌付きトラックを借りて運搬から始めた。ハドロンホールに到着後、磁石の通電試験を行い機器に問題ないことを確認した。その後は図5に示す通り、ケーブル引きをした後に磁石を含めた検出器の架台の設置および位置決め、そして検出器の設置及びケーブル接続を行った。検出器の運用が可能で信号が見えることを確認すると同時に、電磁石や周辺温度のモニターするための熱電対、外から中の状況を見るためのカメラと照明の設置も行った。電磁石は電流値や温度に異常が出た場合には自動的にシャットダウンするインターロックシステムを構築し運用している。導入機器がすべてリモートで運用できることを確認し、動作確認後、この領域はコンクリートブロックで閉じられた。次にアクセスできるのは夏のシャットダウンの時の予定である。

この測定の実現には、神戸大学、九州大学の参加、そして測定器開発センターを構成するグループの協力体制が欠かせなかったといえる。神戸大学からは前田氏と山口君(修士1年)がシンチレータ・パッドをMPPCで読み出す検出器を作成、提供してくれた。九州大学からは音野氏、東城氏の指導の下、田中君と東地君(共に修士1年)が参加し、トリガーカウンタとエアロジェルカウンターの作成および準備をしてくれた。測定およびその後の解析にも行い、結果を導出する予定である。ITDCのエレクトロニクス・グループからは本多氏、五十嵐氏がHUL、AMANEQモジュールを使った計数測定および連続読み出しシステムの提供をしてくれた。メカニカルエンジニアリング・グループの鈴木氏は検出器の架台のデザインおよび組み上げを行ってもらった。狭い領域に電磁石と検出器をうまく配置することができた。低温グループからは小田氏、川井氏、近藤氏、榎田氏に電磁石の安定運用のために必要なガウスメータやサーモメータの提供、そして移動時のトラックの手配などを行ってもらった。

J-PARC のメインリングは 2025 年 1 月 16 日から運転が開始され、同日の夜にはハドロンホールにもビームが供給され始める予定である。その後二日で最大ビーム強度 80 kW での定常運転にまで到達する予定である。早々に検出器の調整を行い、ビーム強度が弱い段階から最大郷土まで、荷電パイオン計数のデータ収集行う予定である。

参考文献

- [1] KEK 素粒子原子核研究所 2024 年 9 月の活動報告：エレクトロニクスシステムグループ, https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/6576/
- [2] KEK 素粒子原子核研究所 2024 年 5 月の活動報告：ITDC 低温センター, https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/6104/
- [3] 測定器開発テストビームラインの 2024 年の採択実験, <https://itdc.kek.jp/testBeamLine/reports2024.html>