

## 素粒子原子核研究所活動報告（2）測定器開発センター 2024 年 6 月 14 日

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。この中でも、センター主体の次世代基幹技術開発の一つである CMOS MAPS 開発の方針も定まってきた。また、本センターの大学共同利用の目玉である測定器開発テストビームラインについても、ビーム輸送路の理解が進み、四重極電磁石の調整をすることによりビーム幅を絞ることができた。これらを中間報告として紹介する。

### 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 $\mu\text{m}$ 、物質量 0.1%  $X_0$  以下が達成できると見込んでいる。今後の開発方針として、センサー部のアバランシェ層を入れ込むことにより、増幅機構の導入を目指すことにした。これにより、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、消費電力の抑制と早い応答を同時に実現することを目指す。放射線耐性を向上させていくことも重要な開発課題である。この開発は、長年 MAPS 開発をしてきたフランスの Strasbourg 大学や CERN の研究者と共同で進めていく予定である。LHC での実験用に開発されていた TJ-Monopix2 がベースとなる。すでに進行中の開発として、Belle II 実験の崩壊点検出器アップグレードのための OBELIX (Optimized BELie II pIXel) がある。これも TJ-Monopix2 がベースとなっており、



図1：2024年4月にストラスブールで開催されたOBELIXのデザイナーズミーティング（ITDCの岸下、岡崎が出席）。

Belle II 実験用に最適化した MAPS である。ITDC ではエレクトロニクスグループの岸下を筆頭に OBELIX のレギュレータ部分のデザインが進行中である (図 1)。既にデザインは最終段階まで進んでおり、今年の夏頃に製作予定である。

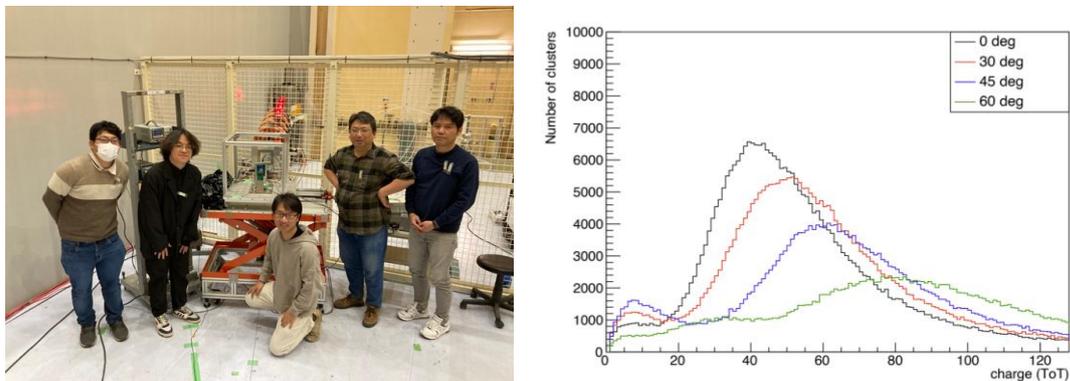


図 2 : (左) 2024 年 3 月に KEK にて行われたビーム試験。(右) ビームの入射角に対する Cluster の ToT 分布の変化

また、OBELIX のデザインと並行しながら TJ-Monopix2 の性能評価も行っている。OBELIX のアナログ信号処理は TJ-Monopix2 と共通の部分が多いため、製作前に TJ-Monopix2 のシミュレーションと実測の比較を行うことで OBELIX のパラメータを決定している。KEK でも Belle II グループと ITDC の共同で TJ-Monopix2 のテストベンチを構築し、テストパルスや線源、KEK の PF-AR テストビームラインを用いて性能評価を行った。

TJ-Monopix2 の評価モジュールは実装時の歩留まりが悪く、KEK にある評価モジュールでは実装時の不具合により、一部のピクセルで閾値のチューニングが期待通りに作動していないことが判明した。正しく動作しているピクセルでは閾値のチューニングにより、ピクセルごとの性能のふらつきを小さくして、動作していることを確認した。また電子ビームの入射角に対する ToT 分布の違いについても確認できており、詳細な解析を進めている (図 2)。

#### PF-AR 測定器開発テストビームラインの状況

去年までは 8mm ピッチのマルチワイヤー Chamber を使っていたが、今年からは Jet Chamber (Drift Chamber) を本格稼働させ、ビームプロファイルの解析が容易にできるようになった。これは以前使用していた読み出しエレキでは読み出し時間幅が足りず、全領域

が使えなかったためである。新エレキで読み出しとして、Belle II CDCの読み出しエレキ更新のためにITDCのエレクトロニクスグループが中心となって開発した回路を導入した(図3)。これは Chamber からの信号を増幅、整形、波高弁別する ASIC を Xilinx Kintex7 FPGA を用いて制御、読み出しをする。この ASIC は、ADC も搭載されているので、波形情報を得ることもできる優れたものである。読み出し基板は、MPPC を使った読み出し用に SPADI-alliance が開発した RAYRAW ボードをそのまま流用した。Belle II CDC 用の ASIC は本来 RAYRAW ボードが用いている MPPC 用の ASIC を改変したものであり、Pin 配置が同じであった。このことから基板はそのまま流用でき、ASIC だけを付け替えた。TDC は FPGA のファームウェアに組み込まれているので、トリガー信号を入力すれば、デジタル情報を SiTCP を介して PC に読み出し保存できる。今回は、京都大学で開発されたファームウェアをそのまま借用している。今後、ファームウェアのアップデートにより波高情報の取得も使用していく予定である。



図 3. Drift chamber の新しい読み出しエレキ。

本ビームラインは、コンバータにより生成された電子群を四重極電磁石の凸型と凹型の組み合わせにより平行にして、テストステージまで導く。それぞれの凸型(凹型)は水平方向に Focus (Defocus) し垂直方向には Defocus (Focus) するものである。ターゲットからビームライン最下流までのコンポーネントの並びは、AR 加速器に組み込まれているワイヤー・ターゲット、銅コンバータ、四重極 Focus (QRF) 磁石、四重極 Defocus (QRD) 磁石、二重極磁石、コンクリートシールド貫通穴、トリガーカウンターT0、四重極 Focus (QSF) 磁石、四重極 Defocus (QSD) 磁石、トリガーカウンターT4、Drift Chamber そして鉛ガラス・カロリメータとなっている。ちなみに四重

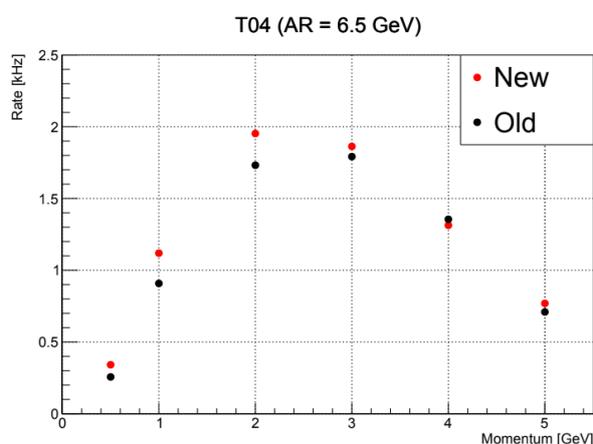


図 4. AR リング 6.5GeV 運転時のテストビームラインでのレート。新・旧の電磁石の設定値でレートにはそれほど違いがない。

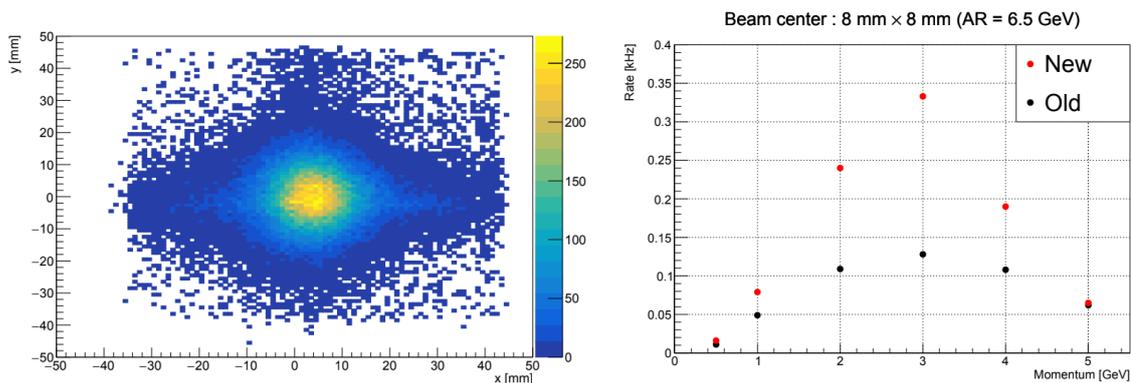


図5. (左) AR リング 6.5GeV 運転時の 3 GeV 電子ビームのプロファイル。(右) 電磁石の設定の新・旧の比較。ビーム中心 8mm×8mm でのレートが 2.6 倍になっている。

極磁石の R と S はコンクリートシールドを境にリング側 (R)、またはステージ側 (S) を示している。新しく行った試みとして、まずは、リング内の四極電磁石の極性を反転させて、ビームレートがどうなるかを調べた。上流が QF (水平収束)、下流が QD (垂直収束) であるが、四極電磁石の下流に設置されている偏向電磁石の垂直アパーチャーが 34 mm (ビームライン上で一番狭い) しかなく、先に垂直に絞った方がこの制限が緩和される可能性があるためである。反転後、四極電磁石の電流値を変えて色々と測定したが、結果としては、良くなる設定値は見つけれなかった。むしろ悪くなり、最大でも 64% しかレートが出ないことが分かった。この傾向は、シミュレーションでも良くならないという結果は得られており、予想通りである。

次に四極電磁石の最適化を行った。今回は、シミュレーションの結果を参考にしながら、3GeV の運動量でのレート (上流のシンチレーションカウンターの T0 と T4 のコインシデンス) が最大になる設定値を探した。QRF と QRD に最大電流 (50A と 28A) を流してから、まずは、QRD の電流値を下げて最大値を探す。そのあと、QRF の電流を下げて、どうなるかを調べて、その後、さらに QRD の電流値を下げるという方針とした。結果として、QRF は最大値の 50A が最もよいが、47.5A でも大差はないので (1%以下の違い)、47.5A を最適値とした。QRD は、20A が最大値となった (図 3)。この結果は、シミュレーションの傾向と一致していた。QSF, QSD も同様に、最大電流 (28A と 28A) を流してから、ビームプロファイルをみながらよいところを探した。それで、QSF が 23.5A、QSD が 25A がよいという結果となった。

ビームがマグネットのアパーチャーにより削られている箇所は、2 か所あると考えている。一つは最初の四重極 QRF の垂直方向の広がり、もう一つは二重極マグネットにより水平方

向に広がるため、である。レートを上げるには、ターゲットと最初の四重極マグネットの距離を短く、運動量選別用二重極マグネットと最終四重極マグネットの距離を短くすることが有効な手段であることが、再認識された。後者については、二重極マグネットは一方向に曲げていることにより起こることで、キックバック用のマグネットを設置することができれば、水平方向の広がりは抑えることが可能である。これはスペースが限られているので、設置は簡単ではないと考えている。

3 GeV で最適化された電流値で、他の運動量でレートがどうなるかを調べたのが図 5 である。他の運動量の時の電流値は、3 GeV の最適値に対して運動量に比例して電流値を決めるが、電流の限界値を超える場合は、限界値とした。このビームレートは標準設定とそれほど大きく変わっていない。今回最適化された設定でビームが良く絞れていることを示す指標として、MCPC の XY それぞれ真ん中の両 1 本から信号来ているレートの運動依存性を調べた結果が図 5 である。この図からビーム中心のレートは大幅に改善していることがわかる。特に、最適化に使った 3 GeV では、標準設定より 2.6 倍よくなっていることがわかる。