

測定器開発センター（ITDC）は素核研が進める実験プロジェクトへの技術支援を進めながら測定器開発テストビームラインおよびプラットフォームの運用、低温・メカニクス・エレクトロニクスの専門性を先鋭化、および融合させる研究を進めている。特に、将来の大規模な国際共同素粒子原子核実験を見据え、国際競争と協力を進めるための半導体検出器と衝突型実験の超伝導ソレノイド磁石の開発をしている。また、量子技術の開発を念頭に置いた低温技術開発を進めている。センター設立から 4 年目となり、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成果が見え始めている。本報告では、各グループを跨ぐ開発プロジェクトについて紹介する。次にセンター主体の次世代基幹技術開発の一つである CMOS MAPS 開発状況、s p そて測定器開発テストビームラインの運用状況と J-PARC ハドロンホールにおけるハドロンビームラインの検討について報告する。エレクトロニクスグループと低温グループについての詳細報告は 2025 年 3 月[1]および 2024 年 5 月[2]の活動報告を参照して頂きたい。

1. グループ間の共同プロジェクトに関して

ITDC 内のグループを跨ぐプロジェクトの中から 2 つを紹介する。一つ目はエレクトロニクスグループ（E-Sys）と低温グループが共同で進めている、Cryo CMOS 開発である。これは最近発展が目覚ましい量子技術の基盤技術の開発である。量子ビットや量子センサーの

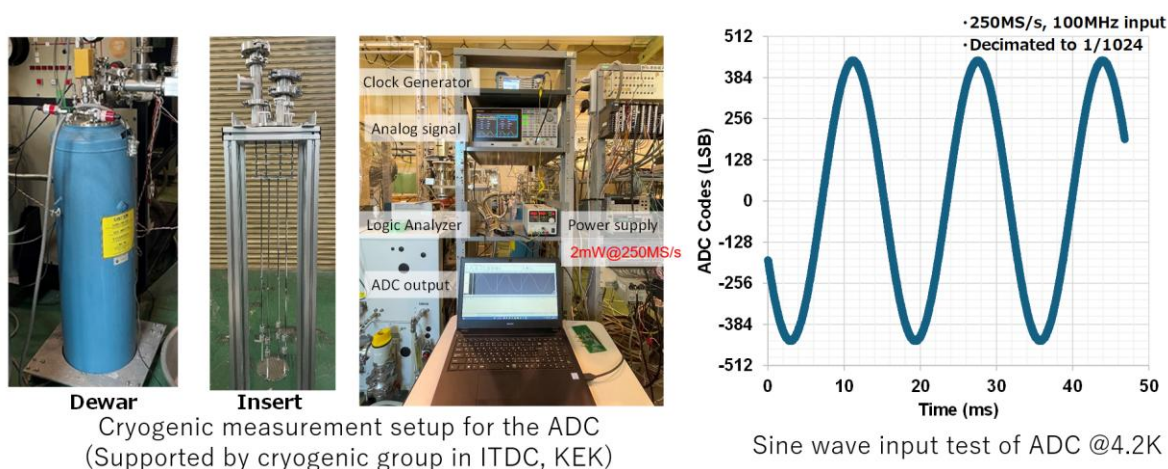


図 1. エレクトロニクスグループと低温グループとの共同プロジェクト、Cryo CMOS 開発。
4.2 K で動作する ADC を設計・試作し、性能評価を同温度で試験し、良好な結果が得られた。

運用には絶対零度近辺の極低温において、AD 変換及び DA 変換を伴う制御が不可欠である。これらの制御はクライオスタットの外からアナログ信号線を通して行なっている。将来的には精度およびレイテンシの観点からセンサーの近くに制御系回路を設置する必要がある。これを実現するためには、低温で動作する AD や DA 変換が可能な ASIC が不可欠で、これが開発の動機である。図 1 は E-sys の宮原氏が設計、22 nm Bulk CMOS process にて製作した 10-bit 250 MS/s の ADC チップの試験風景である。低温グループの岡本氏により 4.2 K での動作試験環境を実現、良好に動作しているという結果が得られている。

2 つ目のグループを跨ぐ開発プロジェクトは、メカニクスグループと低温グループが進める衝突型加速器実験に必要な薄肉・超伝導ソレノイド磁石のアルミ安定化線材の開発である。これまで線材を提供してきた製作会社がすべて手を引いてしまったことで、技術の再開発が必要となっている。我々は CERN と共同開発を進めており、昨年よりイタリアの製作会社において試作を始めている。

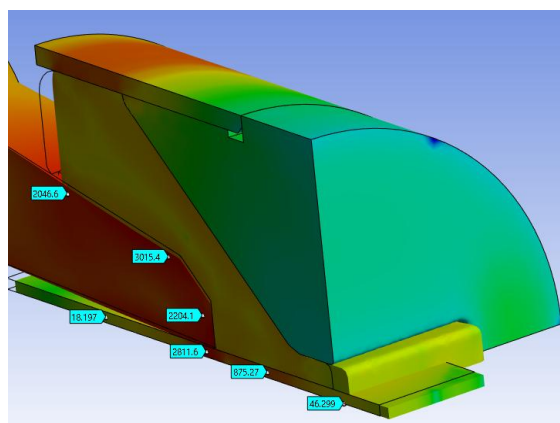


図 2. メカグループと低温グループの共同プロジェクト、薄肉・超伝導ソレノイド電磁石の線材製作過程のシミュレーション。

この試作において、図 2 に示すアルミと線材を押し出し、アルミ安定化線材として一体形成する過程がうまく行かない状況であった。ここでメカニクスグループが開発に参入、ANSIS によるシミュレーション解析が開始された。これにより押し出し行程がうまく行かない原因を明確にすることが出来るようになりつつある。この解析により得られた情報を足掛かりに製作過程に変更を加え、一つのハードルを越えることができた。この過程は、適切な温度に制御されたアルミに圧力をかけて押し出しているため、計算がうまく行かない領域であった。この計算技術の確立により職人技を数値解析が可能になり、実験に必要な形状の超電導線材の製作が可能となると見込んでいる。

2. CMOS MAPS の開発について

測定器開発センターの CMOS MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor)開発方針として、センサー部に増幅機構を導入することを第一に置いている。この手法により、アナログ回路の

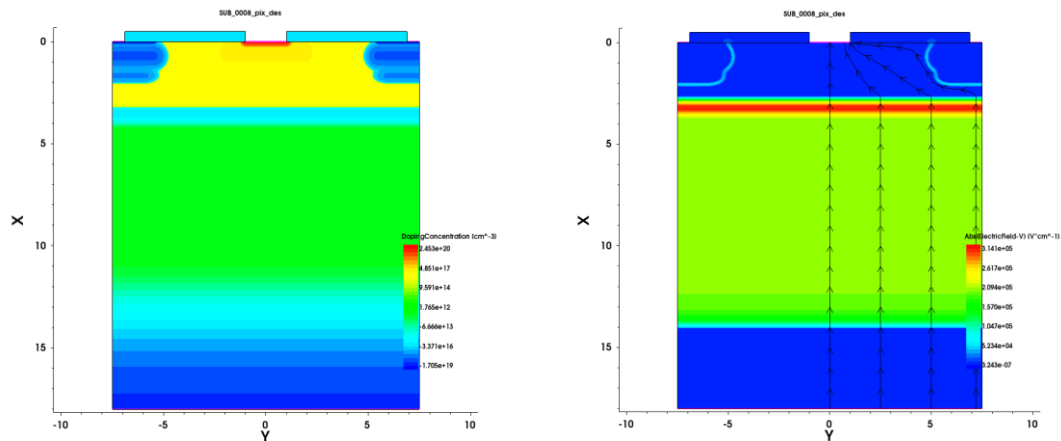


図 3. CMOS プロセスで試作する増幅層をいれたダイオード構造のシミュレーション。赤い領域で増幅が起きる。（左）不純物濃度の推定に使用する構造、（右）位置依存性をなくす構造。

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が実現できると見込んでいる。この増幅層を 180 nm CMOS プロセスで先行導入に成功している CERN グループ、そして MAPS 開発を長年リードしているフランスのストラスブールとの共同研究を進めている。2025 年前半にこの開発の試作プロセスをテープアウトする予定があったので、それに合わせて我々の独自のデザインを入れ込んだ。KEK としては最初の試作となるため、使用するプロセスの理解を重点に置いている。図 4 に今回の試作で製作するダイオードのシミュレーション結果を示す。

CMOS プロセスで増幅層を導入するには、単純に p 層と n 層を積層したダイオード構造に加え、それぞれの層の不純物濃度とその位置を制御することが必要である。製作企業からどのような構造の実現は可能かといったデザインルールなどは提供されている。しかしながら、増幅層の設計に必要な正確な不純物濃度は開示してくれない。そこで、この基礎パラメータが測定で推定できるダイオード構造を製作することにした。CERN グループが実現した増幅層を持つセンサーは CASSIA と呼ばれている。この CASSIA の構造(p 層がピクセル内の一部のみに存在、増幅層も一部のみの)の場合、ピクセル内で増幅率の位置依存性が見えてしまう。Nimplant の層をピクセル全体に入れて、p 層もピクセル内に一様に配置すれば、Nimplant の層と p 層の間に増幅層が一様にできるという考察をした。実際にそのような構造を入れた試作チップをデザインした。図 4 に今回のテープアウトで製作するチップの配線図を示す。大きさは 5.5 mm × 2.0 mm である。左側の大きな構造が 300 μm 角のダイオードを 3x3 の格子が 3 セット配置している。不純物濃度の推定をするために、出来るだ

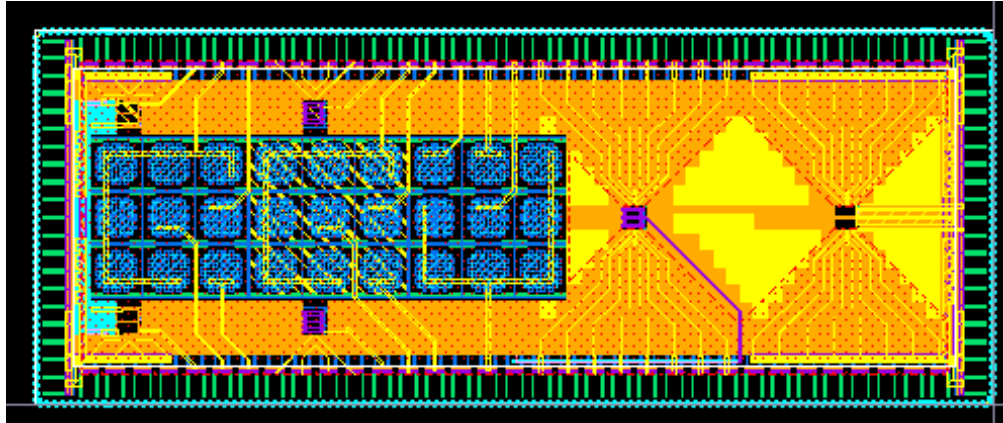


図4．ストラスブール大と共同で製作する試作チップの配線図。全体で 5.5 mm×2.0 mm の地
プになる。不純物濃度の推定のためのダイオードが 3 x 3 の格子構造を 3 セット、15 μ m 角の
ピクセルセンサーを入れ込んでいる。

け大きな構造を入れ込んだのが特徴になっている。また、15 μ m 角のピクセルセンサーも
含まれている。

MAPS を使った検出器づくりの一環として進めているのが、アバランシェ層を持たない
MAPS である MALTA2 を複数台もちいたテレスコープの製作である。これは筑波大学お
よび KEK の EF グループと協力して進めている。2025 年 6 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。今回は 3 台目の MALTA2 を
導入し、運用上の問題点の洗い出しも含めて行った。今回は MALTA2 の動作パラメータも
設定しなおすことにより全チップで目標である 98.5%以上を達成することができた。

MAPS 関連のプロジェクトとしてストラスブール大と進めているのが、MAPS Academy で
ある。これは Summer School 形式のイベントで、第一回目として 2025 年 7 月 23 日～30 日
の日程で KEK つくばキャンパスにて開催する。MAPS 開発をするためのシミュレーション
や回路設計ツールなどを実習形式で習得する試みである。また、MAPS センサーを実際に
動かし、トラッキングまで行う実習も行う。世界中から参加の募集を募り、数多くの応募者
があった。実習が中心であるため参加者は 20 名に絞り実施する。MAPS に特化したスクー
ルは世界的にも初めての試みであり、まだ準備段階であるが、実りの多いイベントである。

3. 測定器開発テストビームラインの運用状況

2025 年 3 月期は 5 実験、2025 年 5～6 月期は 6 実験が実施された。ビームは計画通りに
供給され、各実験とも申請通りのビームタイムを確保することが出来た。加速器第 6 系の

皆様のおかげである。上記の実験のうち、2件は海外からのユーザーが中心の実験で、中国と韓国からそれぞれ10名以上の参加があった。カロリメータの試験ということで、実験のセットアップも比較的大掛かりである。今回は実験装置が中国からの輸送になり、税関通過などいろいろ不確定な要素があったが、おおよそ予定通りに進めることが出来ていた。

今期で一番大きな問題となったのは、電源に関することである。使用する機器は220Vが使われており、昇圧器が必要になっている。今回はユーザーが使用する昇圧器の使用方法が適切でなく、漏電が起きた。放射光実験施設では放射線管理区域内でのこのようなケースの対応手順が定められているが、測定器開発テストビームラインではそれが確立できていなかった。機器の安全な利用方法の確立とその確認に少し時間がかかり、ビームタイムを少し削ることになった。

今後、このようなケースは増えていくと予想される。220V電源ラインの供給、通電試験を行える場所の確保など、施設面の強化を行っている。また同様の案件が起きた時の対応策、復旧手順の明確化など、運用面の整備も進め、10月期からの運用に備えている。

夏のシャットダウン中には、テストビーム輸送の効率を向上させるため、四極電磁石の配置換えを行う予定である。これは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の比較から検討・計画したものである。この改変により、ビーム強度は約2倍程度向上する予定である。

4. 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

測定器開発センターでは、昨年度よりハドロン粒子によるテストビームの設置を検討している。2025年4月に行った測定器開発テストビームラインワークショップ[4]において、J-PARC ハドロンホールにおけるテストビームラインの設置可能性について議論した。可能性としては次の3つが上げられる。

- ① π 1.0 ビームライン, 運動量 ~ 1.0 GeV/c, 予想粒子数 $\sim 10^3$ 程度
- ② K1.1 ビームライン, 運動量 ~ 1.1 GeV/c, 予想粒子数 $\sim 10^7$ 程度
- ③ π 20 ビームライン, 運動量 ~ 20.0 GeV/c, 予想粒子数 $\sim 10^6$ 程度

もし③が実現できると、世界に誇れるテストビームラインになることは間違いない。昨年度、ランバートソン電磁石をターゲットとして利用し、2次粒子数を計測する T106 実験が実施され、その結果が報告された。粒子数や粒子種も計測され、予想通り、魅力的なビームラインになることが分かっている。これをハドロンの物理に利用する計画が進行中であるため、テストビームラインとしての設営は難しい。しかりながら、このビームラインテスト実験として利用することが可能になることは留意すべきである。②は粒子数が多く、セパレータ磁石の利用が可能なビームラインであるが、再整備にかかる費用が高いこと、また実験エリアとしてのスペースが狭いことがあり、テストビームライン設営は簡単ではない。

オプション①は運動量が低いものの、現実的で実行可能とされている。ハドロンホールの A ラインの生成標的から 50 度角度で設置された粒子線輸送パイプが π 1.0 ラインにあたる。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 T105 実験として粒子数計測をおこなっている。2024 年 12 月までに実験セットアップ[5]を導入、2025 年 1 月からのビームでデータ取得を行った。2025 年 4 月にセットアップを更新する機会があったので、中性子対策でポリエチレンの遮蔽体の導入、追加のカウンター（シンチレーションカウンタおよびエアロジェルカウンタ）を入れた。読出しに PMT アンプを導入することにより、また HV の設定を出来るだけ下げ、入射頻度に対する耐性を向上させ、安定動作する状態を作ることが出来た。

今期はメインリングからの遅い取り出しで最大出力の記録が出ており、本実験でも 92.5 kW 運転時のデータを取得している。これまでの解析で、3つのシンチレーションカウンタのコインシデンスは 1.4~1.8 M hits / spill で、効率補正を入れると 5 M hits/spill 程度の粒子数が得られ、この中で 550 MeV 以上の荷電 π 粒子は 10%程度になると見積もられている。現在、最終結果を固めるための解析を進めている。6 月にスペインのバレンシアで開催されたテストビームラインの国際会議 BTTB13[6]で KEK でのテストビームラインの運用状況に

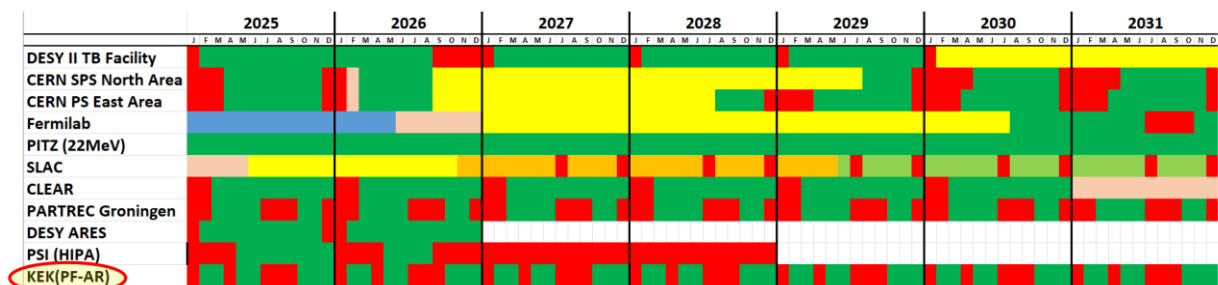


図4．世界のテストビームラインの運用計画。緑の期間が運用予定、赤は停止期間、そして黄色・青色は長期シャットダウンを示している。

ついて報告してきた。また、世界のテストビームラインの運用状況も把握することができた。図5に示すのは各ビームラインの予定で、CERN、DESY、SLACそしてFermilabの運転停止期間がまとめられている。アメリカのビームラインは2030年ごろまで利用がかなり制限されている。ヨーロッパではCERNが2026年から2年間程度のシャットダウンがある。その間、DESYの電子ビームラインが使えることが分かった。KEKに電子ビームラインには長期シャットダウン期間がなく、海外からのユーザーが拡大していくと予想できる。

参考文献

- [1] KEK 素粒子原子核研究所 2025 年 3 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/7142/
- [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/7401/
- [3] 測定器開発テストビームラインのこれまでの採択実験, <https://itdc.kek.jp/testBeamLine/>
- [4] 第2回測定器開発テストビームラインワークショップ (2025/4/3~4/4), <https://kds.kek.jp/event/53863/>
- [5] KEK 素粒子原子核研究所 2024 年 1 月の活動報告：測定器開発センター, https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/7044/