

## 素粒子原子核研究所活動報告（1）測定器開発センター 2026 年 7 月 14 日

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。2022 年の ITDC 設立後、はじめての外部委員による評価委員会を 2026 年 4 月 8 日に行なった。今回の活動報告は、最初に評価委員会に関して簡単な広告し、次に ITDC が進める各グループの研究状況に関して記述し、最後に、ITDC が実施したイベントをまとめる。

### 1. 第一回測定器開発センター評価委員会

評価委員会では、ITDC が運転する測定器開発テストビームライン、ITDC の低温・メカニクス、エレクトロニクスのサブグループが進めている開発とその実績、ITDC が次世代の検出器開発としてトップダウンで進めようと考えているモノリシックアクティブピクセルセンサー（MAPS）の開発状況、そして最後に、コミュニティの検出器開発促進のために ITDC が支援する測定器開発プラットフォームとコライダーエレクトロニクスフォーラムにおける活動を報告し、それらの活動実績に関して評価いただくとともに、今後の持続的な発展をするために何が必要なのかという助言を得た。ITDC 主導の測定器開発ロードマップやテストビームラインの機能や共同利用のユーザー拡大策、プラットフォームの活動内容や開発方針や改善案が評価の対象である。評価委員会からは、ITDC が大学共同利用としてコミュニティとのハブとしての役割が担えていること、ITDC が進める研究戦略が適切であることなどが評価された一方で、組織的な重複などを取り除きながら、限られたリソースの中で今後の活動をどうさらに発展させていくことができるか、問題点と改善案が提案された。今後、指摘された問題点の改善に取り組んでいく。

### 2. 測定器開発テストビームラインの状況

測定器開発テストビームラインの 2026 年 2～3 月期は 5 件のテスト実験が実施され、2025 年度は計 18 件の運用となった。続く 5～6 月期は 8 件の共同利用申請があり、5 月 14 日から順次実験を展開している。なお、パラサイト実験の申し込みは随時受付中である。6 月 2 日からは PF-AR 蓄積リングが 5 GeV で運転され、四極磁石の温度上昇対策として扇風機の設置や電流量の調整を行いながらビーム供給を維持した。終盤に瞬停があったものの、実験への大きな支障は免れている。

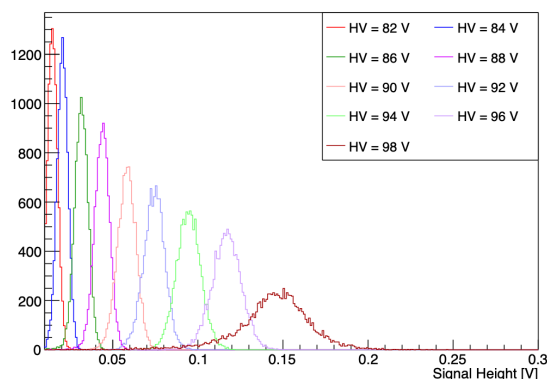
ビーム品質向上のための各種 Study も前進した。トップアップ入射時のレート急上昇現象について加速器第 6 系と連携したデータ解析が進むほか、ガフクロミックフィルムを用いた簡易ビーム位置確認という新たな試みの解析も進行中である。また、偏極磁石上流へのビームモニター設置検討や、コンバーターからのプロファイル測定テストも実施された。

成果発信や情報交換も活発である。日本物理学会 2026 年春季大会では、当ビームラインのプロファイルやハドロンテストビームライン関連の計数測定について報告を行った。国際会議「BTTB14」では KEK の成果を発表し、CERN や DESY のスタッフと有意義な情報交換を交

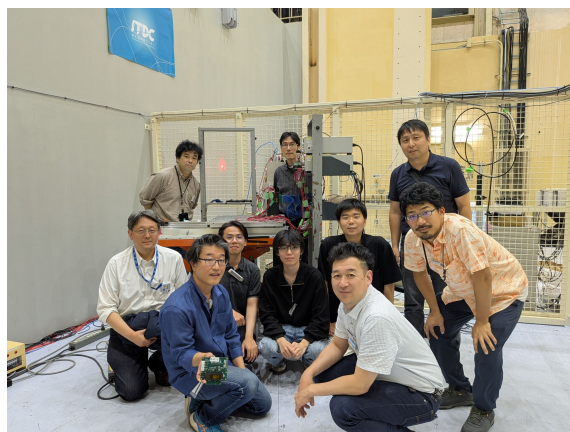
わした。また、6月22～24日には71名が参加する素核研ワークショップを開催し、機能強化や輝度向上に向けた活発な議論や交流が行われた。

### 3. MAPS 開発の状況

KEK 独自デザインの増幅層付き MAPS は 12 月にサブミットされ、夏頃の納品に向けてストラスブール大学と評価計画や基板設計の議論が進んでいる。CERN と共同開発中の増幅層付き MAPS 「CASSIA」は、レーザー試験による信号確認や光量依存性測定を行い、日本物理学会でHV依存性などを報告した。現在は非同期信号のシミュレーション解析や、保護用 deep p-well の電位差を制御できる新 PCB での検証に加え、テストビームラインでのパラサイト実験による荷電粒子応答の測定を試みている。



テストビームライン用テレスコープ（ビームトラッカー）に用いる「MALTA2」の準備も前進している。EF グループと連携した実装・アセンブリにより読出し可能なチップが 5 基まで揃い、一部で確認された電源等の不具合について原因調査と歩留まり向上を進めている。本開発は筑波大、広島大、九州大、大阪大との協力体制で推進中である。



6 月には 4 台の MALTA2 を用いた電子ビーム試験を実施した。柔軟なトリガー設定が可能な読出しシステムやオンラインモニターが初日から順調に稼働し、良好なデータを取得した。現在は DAQ システムの動作検証や、運動量キャリブレーションに向けた永久磁石設置データの解析を進めており、年内のトラッカー完成を目指して 9 月の学会報告やサポートフレーム等の整備を継続する。

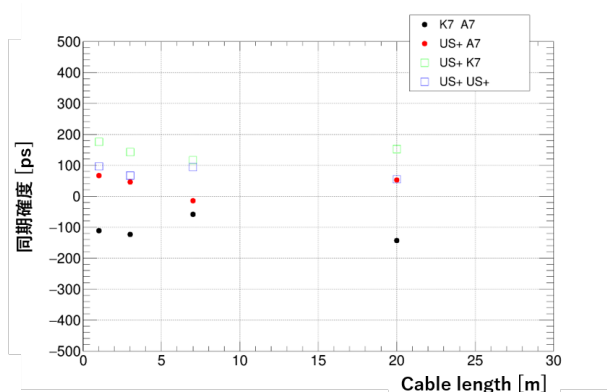
### 4. エレクトロニクスシステム (E-sys) グループの状況

E-sys グループでは素粒子原子核実験を支える計測システム技術を開発している。近年は高精度時刻同期通信、次世代 DAQ、AI・機械学習活用技術、および極限環境下で動作する ASIC の研究開発を中心に推進している。大規模実験に向けた基盤技術の高度化に加え、AI 技術の積極活用や他分野への技術展開など、社会実装も見据えた取組を行っている。

#### (1) 長距離通信・高精度時刻同期技術 (Mikumari / LACCP)

加速器実験では、検出器間で高精度な時刻同期が必要となる。Mikumari Link および LACCP (Time Synchronization Protocol) の機能拡張を進め、AMD UltraScale FPGA への対応および異なる FPGA ファミリ間での通信を実現した。評価では $\pm 300$  ps 以内の同期精度を達成し、様々な回路へ適用可能な時刻同期技術としての有効性を確認した。

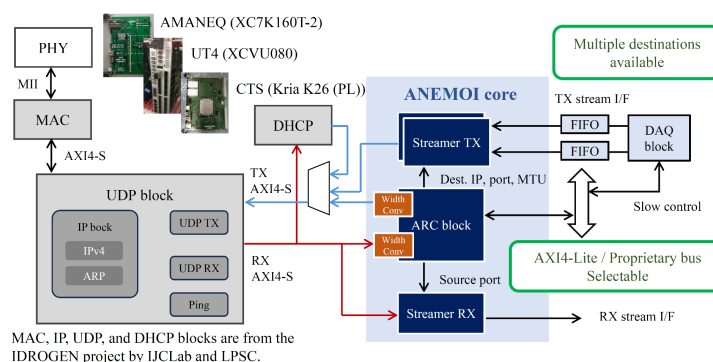
さらに、DDMTD 技術を導入し、10 km 光ファイバーにおける温度変動由来の伝送遅延変化を高精度に測定できるようになった。Hyper-K や K-program で必要とされる広域分散型検出器システムへの応用が計画されている。



時刻同期精度のグラフ。横軸が光ファイバー長、縦軸が同期精度。異なるFPGAデバイス間でもファイバー長によらず $\pm 300$  psの精度で同期出来ている。

## (2) 次世代 DAQ 技術 (ANEMOI および連続読出し DAQ)

データ収集システムの高速化に向け、UDP ベース通信プロトコル ANEMOI (Adaptive Network Messaging for Open Instruments) を開発した。ANEMOI は、DHCP 対応、複数ホストからの制御、複数宛先へのデータ配信など、従来の



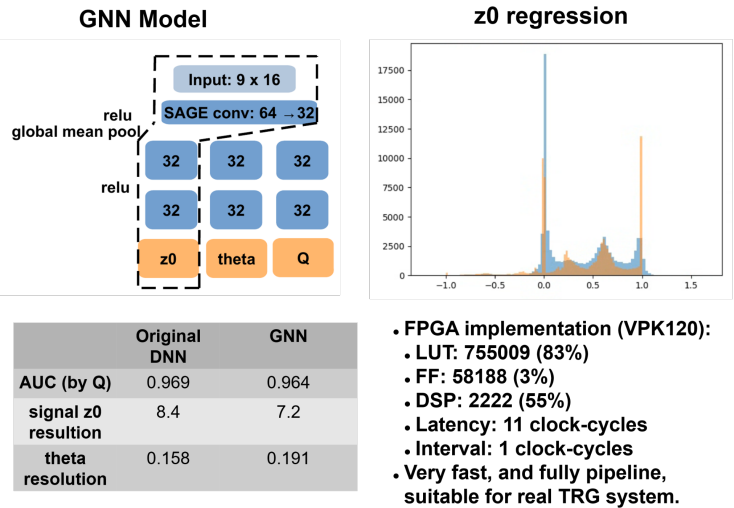
SiTCP では困難であった機能を実現している。性能評価では 1 GbE 版および 10 GbE 版の開発を完了し、10 GbE 環境において約 9.8 Gbps の通信性能を達成した。今後は 40 GbE および 100 GbE への展開を目指している。

また、次世代 DAQ ソフトウェアでは、Front-End 回路が放射線による複数ビットエラー等により停止した場合でもデータ取得を継続可能とする部分再起動機能の開発を進めた。状

態監視機能やデータビルド成功率の可視化機能も整備し、高レートデータ収集環境における信頼性向上に取り組んでいる。

(3) AI・機械学習技術の活用

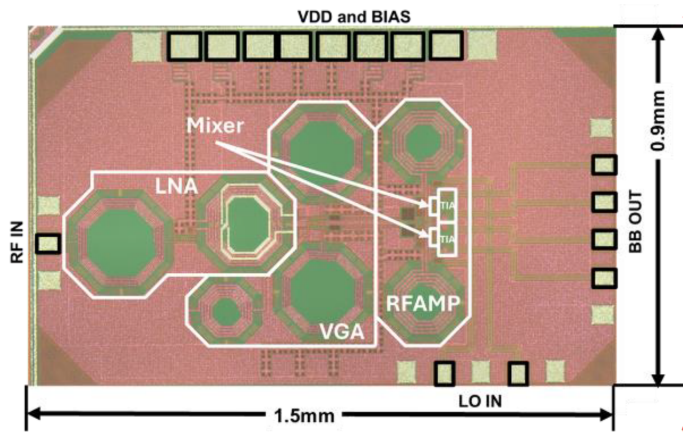
AI および機械学習技術を、実験データ解析と半導体設計の両分野へ展開した。Belle II 実験では、DNN (Deep Neural Network) を用いた 3 次元飛跡再構成の高度化を進めるとともに、CNN、GNN、Gaussian Process など複数の機械学習モデルを比較評価した (右図)。さらに、将来的な FPGA 実装を視野に入れたリアルタイム推



論技術の検討を進めており、高ルミノシティ環境における高速トリガー処理への応用が期待される。また、アナログ回路設計分野では、LLM (大規模言語モデル) と自動レイアウト生成技術を利用した設計自動化環境の構築を進めた。自然言語による仕様入力から回路設計までを支援する新たな設計フローの開発を進めており、ASIC 開発の効率化や設計ノウハウ継承への貢献が期待される。AI・機械学習技術を研究開発プロセスそのものへ取り込むことで、計測システム開発の高度化を目指している。

(4) 高放射線耐性 ASIC による社会貢献

福島第一原子力発電所の廃炉作業では、作業員が立ち入れない高線量環境下で利用可能な無線通信技術が求められている。この社会課題に対し、高耐放射線無線通信 ASIC の研究開発を進めた。東京科学大学と協力し、高耐放射線設計技術を用いて 500 kGy の超高線量環境でも動作可能な Wi-Fi 受信チップ (右図) を実現した。本成果



は ISSCC 2026 に採択されるとともに、共同プレスリリースとして公開された。さらに、ADC、DAC、PLL に対する  $\gamma$  線照射試験では 1 MGy を超える環境下でも正常動作を確認し

た。現在は送信回路・受信回路を統合した無線通信 ASIC の開発を進めており、加速器施設のみならず原子力分野での遠隔計測や監視システムへの展開を目指している。素粒子原子核実験で培った高耐放射線回路技術を社会課題解決へつなげる取り組みとして、今後の実用化が期待される。

## 5. 低温・メカグループの状況

低温・メカグループは、KEK で推進しているプロジェクト支援に加え、素粒子原子核実験を支える機械設計技術、極低温冷却技術、および超伝導磁石技術の研究開発を進めている。

### (1) メカニカルグループによるプロジェクト支援

IWCD 計画では、設計会社と協力して実機の実施設計を進めている。外槽構造ではジオメンブレンを用いた止水構造の開発を進め、モックアップによる水密試験を実施して必要な止水条件を確立した。さらにコスト低減を目的としてジオメンブレン溶着施工法の最適化を進めるとともに、浮体構造の圧縮強度試験の準備を進めている。

Belle II 実験では、将来の SuperKEKB/Belle II 改良に向けて、衝突点近傍の QCS クライオスタット、ビームパイプ、Pixel・シリコン検出器および CDC 内筒の設計検討を進めている。また、LS2 に向けた Remote Vacuum Connection (RVC) の研究開発では、QCS とビームパイプとの遠隔真空接続を実現するため、左右非対称ビームパイプでの試験評価および実機形状に近い Mockup3 の設計を進めている（右図）。



Belle 検出器については、地震応答解析により架台の耐震性能を評価し、必要な耐震補強方法の検討を進めた。また、両端部 QCS 架橋の長期沈降が検出器アライメントへ与える影響を評価し、対策の検討を進めている。COMET 実験ではストローチェンバー4号機の組立を継続し、検出器製作に協力している。

### (2) 低温グループによるプロジェクト支援

Belle II 超伝導ソレノイド冷却システムでは、実験運転終了後の消磁・加温運転を実施した。加温運転中に制御シーケンス異常に伴う安全弁作動および圧縮機停止事象が発生

し、原因解析と再発防止策の検討を進めている。また、6月に発生した停電復旧時には冷却システムを迅速に再立ち上げ、実験運転を継続した。

次世代単相 CO<sub>2</sub>冷却システムの導入に向け、マックスプランク研究所と連携して架台および冷却設備の整備を進めている。

ニュートリノ超伝導ビームラインおよび COMET 超伝導冷却システムでは停止期間を利用した保守・評価を実施し、特に COMET ではマグネットクエンチ事象の原因解析を進め、今後の安定運転に向けた知見の蓄積を進めている。

### (3) 極低温冷凍機開発

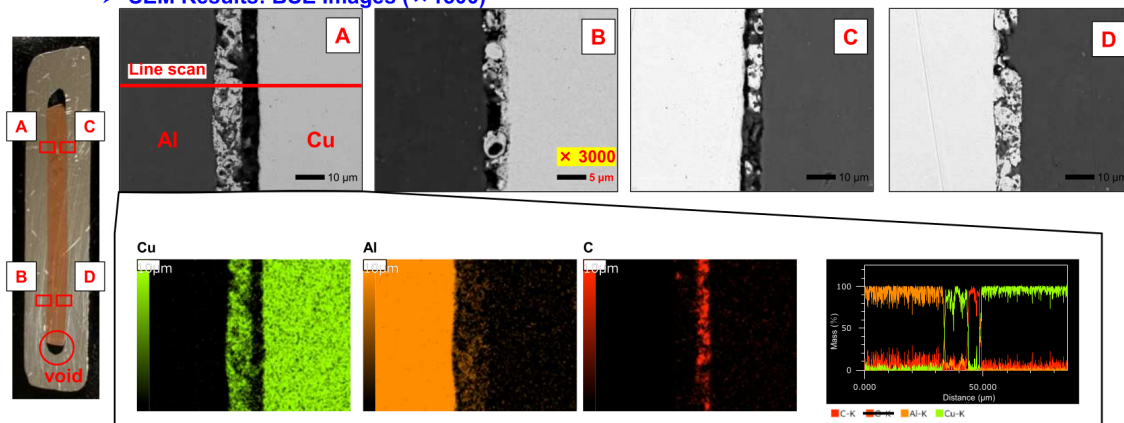
wet 式希釈冷凍機ならびに 0.3 K ソープション冷凍機の整備を進めている。またヘリウムを用いたサブケルビン冷凍機開発を進めており、現在常流動・超流動ヘリウムの熱輸送特性を可視化するためのクライオスタットの構築を進めている。この冷却システムは活性炭へのヘリウムの物理吸着現象を用いるため、吸着特性を評価するための実験装置の設計も並行して進めている。

### (4) アルミ安定化超伝導線材開発

検出器用超伝導磁石の高性能化を目指し、CERN との国際共同研究としてアルミ安定化超伝導線材の開発を進めている。第 1 段階である銅ストリップへのアルミ被覆加工を完了し、CERN での品質評価と並行して、KEK では断面観察による接合状態の評価を実施した（下図）。現在は第 2 段階となる銅撚線へのアルミ被覆加工試作へ移行し、製造条件の最適化を進めている。また、試作と並行してアルミ被覆加工プロセスの数値シミュレーションを進め、解析環境を構築した。試作結果との比較評価を通して解析モデルの高度化と入力条件の最適化を進めており、加工品質の予測および製造条件の効率的な最適化への応用を目指している。

#### ◆ Al-Cu\_Batch01-TR1

➤ SEM Results: BSE Images (×1500)



## 6. ITDC 関連イベント (2026 年 2 月～)

測定器開発テストビームライン 共同利用

- 2 月-3 月期 (2/5 ~ 3/2) : 5 件
- 5 月-6 月期 (5/14 ~ 6/19) : 8 件

研究会 :

- Platform B 研究会 3/2-3/3
- テストビームライン研究会 : 6/22-6/24
- シンチレータ高度化研究会 : 7/1-7/2

トレーニングコース :

- FPGA トレーニングコース (初級) 3/4 - 3/5 @ 九州大学伊都キャンパス
- FPGA トレーニングコース (中級) 6/17-6/19 @ KEK
- FPGA トレーニングコース 英語版 6/22-24 @KEK

プレスリリース

- 超高線量環境下で動作する Wi-Fi チップの開発に成功  
<https://www.kek.jp/ja/press/202602141000>