

E-sys 活動報告

Status of electronics system group IPNS

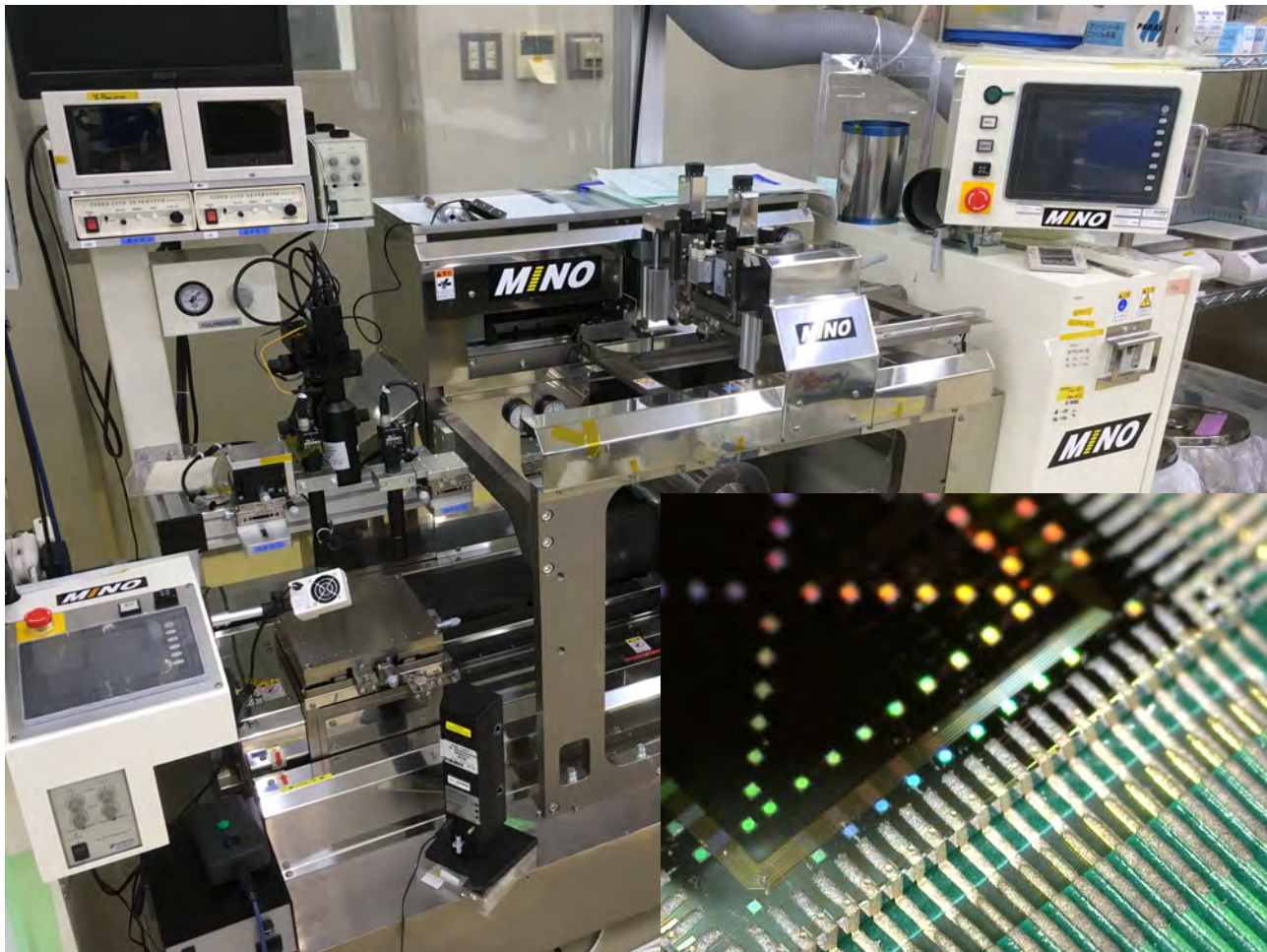
Feb
2024

contents

- プロジェクトへの貢献
- 萌芽研究・技術開発
- 教育をベースとした共同開発と学際連携
- 国際連携・社会貢献等
- E-sysの人



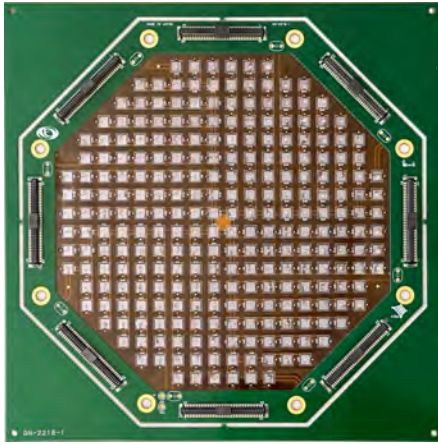
新たな現象や非常に稀な現象を捉えることを目標とする世界最先端の研究において、センサーや信号処理システム等の装置は世界に1つしか無いため自分自身で開発しなくてはなりません。エレクトロニクスシステムグループ(E-sys)では、このような世界に1点だけの実験装置のセンサーからシステムに至るまでを各実験グループと連携して開発し、それらをOpen-Itを通して知と技術の共有を行っています。測定器開発センターの一員として活動を行っています。



写真の説明：集積回路の新しい実装手段として長年かけて行ってきた印刷技術を用いた高密度実装研究開発が身を結びつつある。この手法は少量多品種低コスト化に寄与するだけでなく、金属から絶縁体まで高精度に印刷することができるため、将来は複雑な形状のセンサーや複数の検出機能を有する測定器への応用が考えられる。上図はKEKに導入される装置で、右図は、この装置を使用して実装された集積回路の写真である。

エレクトロニクスシステムグループ (E-sys)は、つくばキャンパス(E-sysつくば)と東海キャンパス(E-sys東海)の2カ所の研究開発教育拠点からなります。

E-sysつくばは半導体検出器および信号処理用エレクトロニクスの要素開発(集積回路開発、PCB:Printed Circuit Board開発)に関しE-sys東海と連携し研究開発を推進しています。

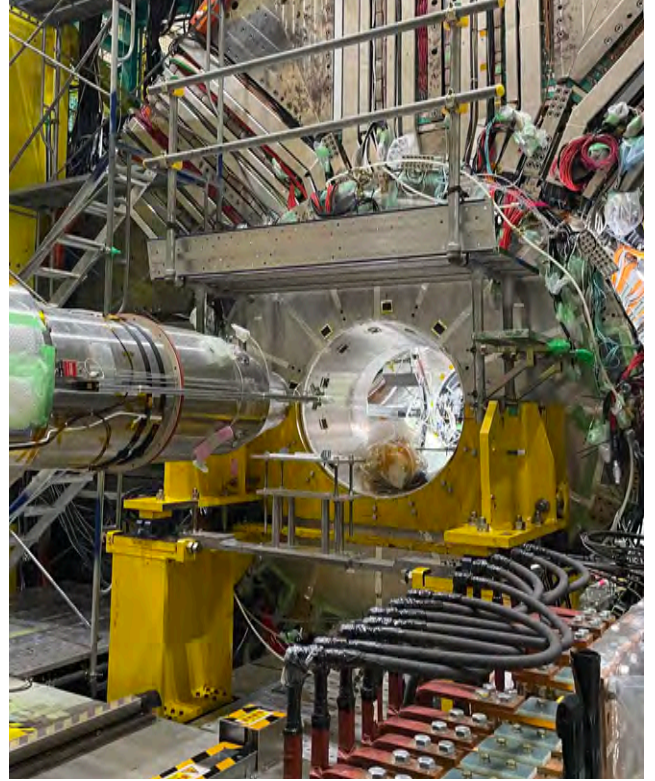


写真の説明：シリコンカーバイト(SiC)検出器をミュオンモニターへ実装し装置化した。

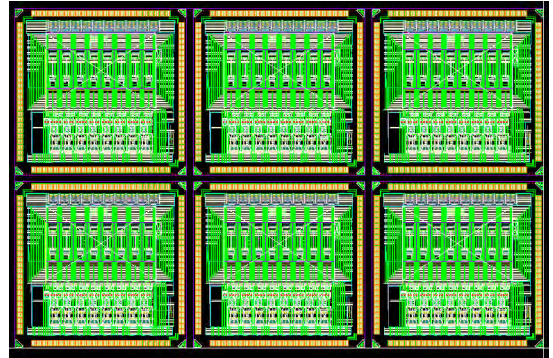
プロジェクトへの貢献 E-sysつくば

つくばサイトでは、ATLASグループ、Belle-IIグループ等コライダー実験を行うグループとの連携開発だけでなくJ-PARCにおける実験用測定装置開発も推進しています。

つくばサイトでは要素技術開発が主ですが、東海分室と協力してシステム開発を行なっています。右上の写真の中央の銀色円筒形の測定器はBelle-II実験のCDCで、この検出器の読み出しに使用するアンプ内蔵の波形デジタルサイザ(Reconfigurable ASD-ADC for Particle Detector:RAPID)が、長期間の評価を経て3000チップが量産されました。チャンネル数にして24000チャンネルです。この集積回路は欧米を凌ぐ技術を用いており、低消費電力で、S/N良く、高速にアナログ情報をデジタル情報に変換できま



写真の説明：Belle-II CDC検出器の写真。中央の円筒状の内側がガスを使用した円筒形ドリフトチェンバー(CDC)である。以前はアンプ、波形デジタルサイザなどは別々の集積回路だったが、下記の集積回路により大幅に消費電力、サイズ、性能が改善された。



写真の説明：RAPIDの量産レイアウト図。量産のためにいくつかの修正がなされ、6チップ一塊で製造された。

す。汎用性が高いので、他の実験でも使用が始まっています。

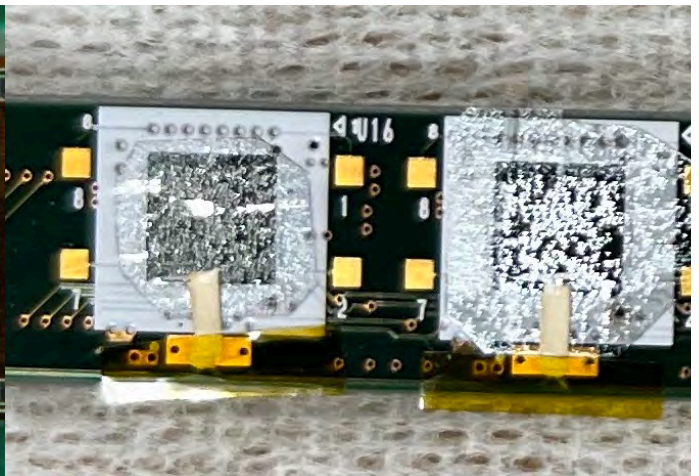
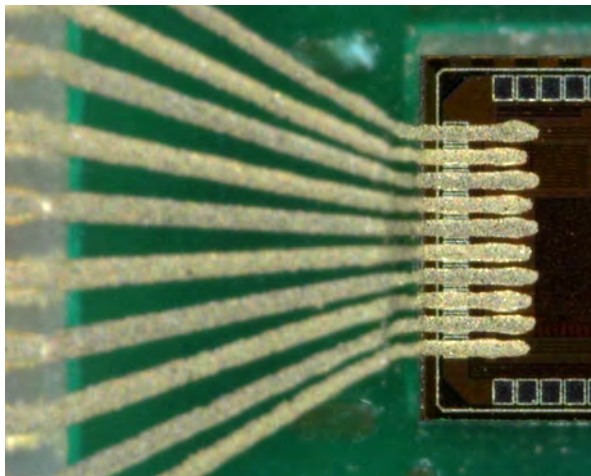
左の写真はCOMET実験用ミュオンモニターで、200チャンネルを超えるシリコンカーバイト(SiC)検出器とその読み出しボードからなります。高放射線耐性を有するSiCセンサーを世界に先駆けて素粒子実験に応用することを目的として、ミュオンビームモニターの開発を進めています。SiCは放射線耐性試験の結果から要求される性能を満たすことが確認されており、現在までに実機に必要な256枚のセンサーチップの特性評価が完了しています。現在は、COMET実験の要求に応じた読み出し回路の製作を進めており、来年度にはプロトタイプが完成できる見込みです。

加速器の高強度・高輝度化のトレンドにそって計測装置の高耐環境性能・多チャンネル高集積・高機能化は更に必要になってきています。そこで我々は長期的視点に立ち、加速器科学で使用する計測技術を先導するためセンサーを含む半導体デバイス開発、高集積、高機能、広帯域をキーワードとして、ピクセル検出器を含む低雑音フロントエンド、高密度実装、デジタイザ、ネットワーク分散データ処理システム開発などを行っています。

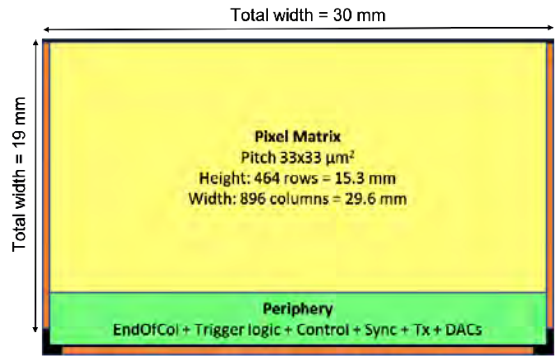
萌芽研究・技術開発

ピクセルセンサー開発

我々はTowerjazz180nmを用い、Belle II upgrade用ピクセルセンサーOBELIX-1のデザインをストラスブルグ等の国際協力で行っています。具体的には回路IP(rail-to-rail bufferなど)の設計を担当しています。今年度内にフルサイズのプロトタイプチップをサブミット予定です。現状では、ストリップセンサーからピクセルセンサーの移行は一部の実験でした行われていませんが、ビーム強度の向上によって、多くの実験でピクセルセンサーが必要になっていると予想されます。よって現段階からKEKにおいて技術力を確立する必要があり、将来はこれらの技術蓄積を元に、独自のピクセル開発に発展させ、多くの実験へ使われるように展開していくつもりです。



写真の説明：左の図はスクリーンオフセット印刷技術を用いて作成した段差乗り越え配線。集積回路電極と基板電極を印刷配線で接続している。最も狭ピッチの部分は、線幅 $50\mu\text{m}$ 、配線間 $15\mu\text{m}$ となっている。右の図はダイヤモンドセンサーを印刷配線で基板実装した様子。写真下側の長方形の基板電極とセンサー電極を接続している縦長の白い配線が印刷配線。



図の説明：Belle-II用ピクセル検出器の概要。黄色い部分がセンサー一部で緑色の部分が読み出し/制御/トリガー生成用エレクトロニクス部分である。これを1単位として複数個並べてBelle-II衝突点付近のバーテックス検出機として使用する予定である。

高密度実装技術開発

我々は、印刷技術を用いて集積回路を実装する新しい手法の開発を産業技術総合研究所と共同研究で行っています。加速器のビーム強度の向上による放射線検出器の高集積化・高機能化に対応した低コストかつ、高密度実装が可能な技術開発が求められています。この課題解決のために、我々は従来の実装技術に代わる高密度実装技術として、産総研と協力し研究開発を行い、KEKにも印刷装置が導入されることになりました。今後は実装技術開発を加速させるつつ、多くの実験プロジェクトへ技術の展開を進めていきます。

特殊な検出器との接続でも、本技術の有用性は実証できています。以下は $40\mu\text{m}$ 厚ダイヤモンドセンサーの実装応用で、ダイヤモンドセンサーは非常に薄く割れやすいため、ワイヤーボンディングなどの一般的な実装技術が使用できません。そこで本技術を用いることを提案してセンサーの実装試験を行いました。その結果、1回目のトライで複数のセンサー実装を成功させ、動作性能も要求値を満たすことを確認しました。



Open source consortium of Instrumentation

複数の機関と連携しエキスパートとのコラボレーションネットワーク"Open-It"、コライダーエレクトロニクスフォーラム、SPADI-Allianceを通して教育活動、プロジェクト推進を通じたコミュニティ全体への積極的な寄与を行っています。

Open-Itは「教育」と「連携」をキーワードにした、1) 教育プログラム、2) 連携開発プログラム、3) 交流プログラムの3つを中心に活動しており、これらの活動は以下のように相互に連携しています。

- 1) 初学者向けの計測技術教育。
- 2) 上記の次のステップの共同研究開発。
- 3) 情報交換、交流の場として研究会。

具体的には、以下のようになります。
今年度の各参加者はそれぞれ計測と制御参加者80名、ASICトレーニングコース参加者66名、FPGAトレーニングコースを核融合科学研究所、東北大学、九州大学で開催し、参加者合計88名。中級コースも開講した。

詳細は<http://openit.kek.jp>参照

コライダーエレクトロニクスフォーラムでは、タスクフォースとして、コライダー実験用高性能FPGAとAI技術を用いた高機能高速トリガー生成技術開発と40GHzを超える高速転送技術の開発を推進するために、ATLAS、Bell-II、ALICE及び関係大学と連携して活動を行っています。(https://kds.kek.jp/category/2369/)

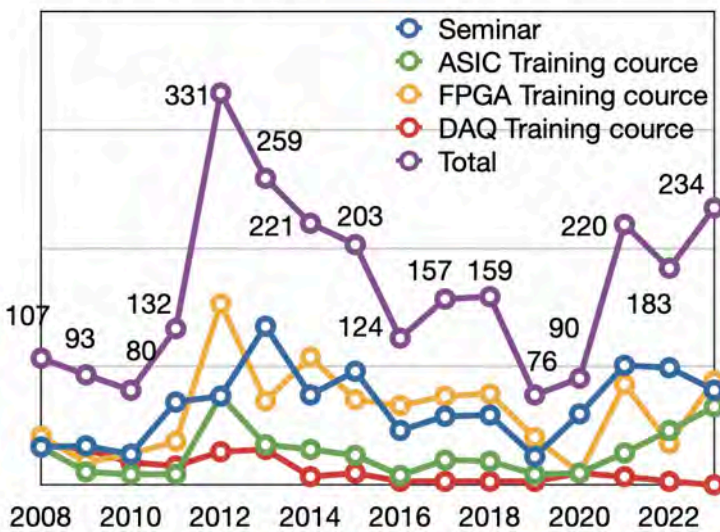
SPADI-Alliance (SPADI-A)はDAQシステムの共通化・標準化を掲げ原子核分野を中心として立ち上がったアライアンスであ

教育・OJTと 研究開発連携 について

る。素核研E-sysはその運営において、阪大RCNP データ収集基盤室、理研RNC 情報処理チーム、東大CNS、東北大ELPHとともに中核を担っており、7つのワーキンググループ (WG) を設置して、それぞれの目的とする開発研究を行っています。このうちWG1とWG3のグループリーダーをE-sys本多と五十嵐が務めており、StreamingDAQ開発において中心的な役割を果たしています。現在、この成果はJ-PARCのみでなくRCNP Grand RaidenにおいてStreaming DAQシステムのチーム試験を行い実験は成功しました。現在RCNPのビームラインではトリガレスに連続的に時刻を記録し、ソフトウェアでコインシデンストリガーを生成するDAQシステムの導入を進めています。またすでに述べたように、この成果を使用しCOMET実験のドリフトチェンバーの読み出しシステムも完成し、現在安定動作しております。

これらの活動と並行して、研究会等の開催も行い研究者間の連携を深めています。右下の図はRCNPで開催された計測システム研究会 <http://openit.kek.jp/workshop/2023/dsys/main>で、ハイブリッド形式で開催され81名の国内外の若手研究者による発表と、白熱した議論が交わされました。

Participants of a seminar and training courses



15年間で2669人の学生、研究者が参加



写真の説明：RCNPで対面会議に参加した研究者の集合写真。フロントエンドからバックエンド及びシステム全体まで幅広い発表が23名の発表者により2日間にわたって行われた。国内外の研究者が、分野を超えて情報交換を行なった。

学際・産学・国際連携 による研究開発

量子コンピューター技術

2022年10月よりムーンショット型研究開発として”100万ビットを超える量子コンピュータ実現のための誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指すムーンショット目標6の研究開発プロジェクト「スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発」に参画し、極低温（4K）で動作するADCの開発に着手しました。
(<https://www.greenlab.kit.ac.jp/qubecs/index.html>)

現在、22nmCMOSプロセスを使用して極低温環境下で動作する量子ビット読み出し用高速ADCを開発しており、その性能を調べるために、4K環境下でのエレクトロニクス評価環境セットアップを低温グループと協力して構築中です。



上記の3人は国外からの留学生で、それぞれ高速デジタルデータインターフェースの研究開発、機械学習アルゴリズムの実装、高性能FPGAを利用した測定システムの開発研究を行っており、その成果発表を3人で自主的に行った。

高性能FPGAを用いたインテリジェント測定システムの開発研究

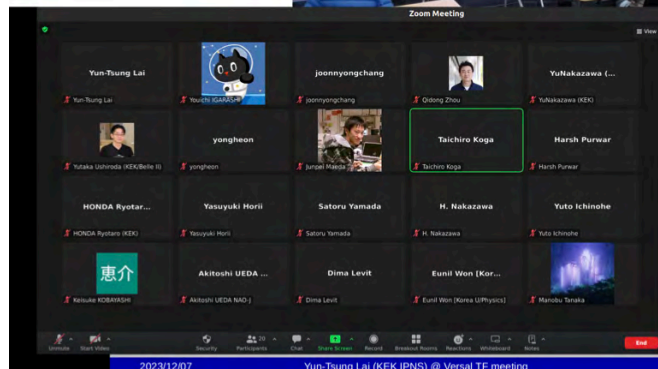
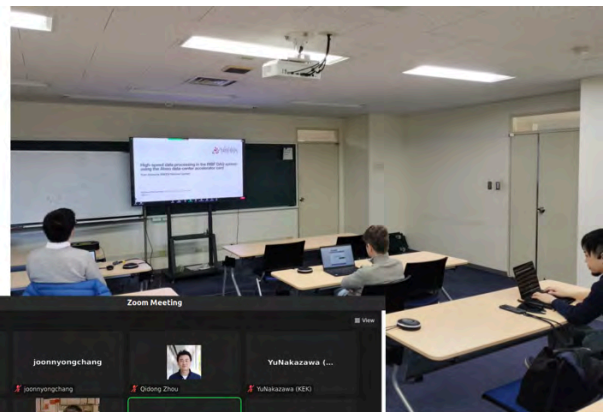
近年FPGA技術が発達し、中央演算処理装置(CPU)、画像処理装置(GPU)、人工知能(AI)エンジンなどがFPGA内に実装されるようになり、数年前では想像もできなかったような使い方ができるようになりました。これらは加速器科学に大きな恩恵をもたらすものですが、一方今までのFPGAのように簡単には使いこなすには時間と費用がかかります。

現在我々の分野では、コライダーエレクトロニクスフォーラム、SPADIアライアンスをはじめ、多くの研究者が連携して高性能FPGAを実験の実験へ応用するための努力を行っています。その中で忘れてはならないのが、“学際・国際・産学連携”です。学際連携においては工学部との連携によるノウハウの蓄積と、応用を推進することで、よりタイムリーに技術の開発とその応用がで

きます。右下の図は、これを念頭に置いた国際研究会の一コマで、分野を横断した各国の研究者が高性能FPGAの技術展開や応用に関して議論を行いました。これらの連携をもとに、国際的な連携が生まれ、学生の交流も活発になり、上図に示すように欧米、アジアから学生がKEKに来所し共同で開発するアクティビティーが育ちつつあります。

今後はこのようなアクティビティーの国際的な拠点として活動できるように環境を整備していくことを念頭に、引き続き国内外、分野横断を推進していければと思っています。

右の図は、高性能FPGAについて、応用、技術の観点から複数の国内外研究機関の若手研究者が集まり、現状と成果及び問題点を議論するために開催した研究会の一コマである。ハイブリッドで行われ、多くの議論、情報交換が行われた。



最先端半導体プロセスで 最先端測定装置開発

岡崎
佑太



●岡崎 佑太……ITDCの人

私は今までATLAS実験やJ-PARC muon g-2/EDM実験で検出器の設計や電源用回路を含むエレクトロニクスの開発、またFPGAを用いたデータ収集システムの開発に従事してきました。

多くの素粒子実験では、位置分解能の高いシリコン検出器を使用して荷電粒子の飛跡を再構成しています。将来の素粒子実験では、より精密な測定を行うために高い位置分解能や低物質量化が必要です。そのためには、シリコン検出器と同じ基板上に信号処理回路を配置したMonolithicな検出器を開発が重要です。これにより、高位置分解能で低物質量化検出器を実現できます。

右図：muon g-2/EDM実験に使用される大型シリコン検出器モジュールを制作しているところ。集積回路等のカスタム品は全て国産開発した。

私は昨年末に測定器開発センターの助教として着任し、将来の素粒子実験のためにCMOSを用いたMonolithic Active Pixel Sensor (MAPS)の開発を進めています。また、E-Sysグループと協力しながらASICの設計も行います。これらの経験で得た知見を基に、検出器部分のデザインに留まらず、MAPSの信号処理回路の設計も進めていきます。

将来においてはMAPSなどの検出器の開発だけでなく、システムとしての開発および実際の運用を見据えた開発を行えるような、強力な日本における測定器開発グループの組織化も推進していきます。



左図：Belle-II ピクセルバーテックス検出器開発準備のため国外で開発されたピクセル検出器を評価しているところ。今後国際協力によりBelle-II用ピクセル検出器の開発を推進する。さらに将来国産ピクセル検出器開発を行い実験へ応用する。

坂口 将尊

高耐放射線集積回路 限界を目指して



●坂口 将尊……E-sysの人

高エネルギー実験で用いられるエレクトロニクスには高集積化、高機能化、高計数率化に加えて高放射線耐性が求められる。今回は私が行っているエレクトロニクスの放射線耐性についての取り組みを紹介します。

高エネルギー実験では加速器ビーム同士を衝突させたり、ターゲットに衝突させたりして生じる反応を測定します。このためビーム衝突点や生じた粒子の崩壊点を囲むように検出器が設置されます。ビーム衝突点や粒子崩壊点のより近い位置へより多くの検出器を設置できれば生成粒子の飛跡や崩壊点の位置分解能が向上しより精密な測定ができます。このため我々はピクセル検出器などの半導体検出器やASICによる読み出し回路を開発して実験の要求に応えています。

加速器ビームや生成粒子が生成する放射線のため、検出器をはじめとするエレクトロニクスは放射線場で長期間に

わたり正常に動作することが求められます。世界的なトレンドとして加速器ビームの高強度化・高輝度化が進展し、放射線に強いエレクトロニクスの開発がますます重要になっています。

半導体検出器やASICなどの半導体デバイスに放射線が照射されると、電気特性の劣化や誤動作が起きます。これは半導体デバイス内部で発生する電離や界面準位、結晶欠陥の影響を受けるため、電離作用の蓄積による「トータルドーズ効果」、1個の放射線の電離作用で起きる「シングルイベント効果」、半導体結晶の損傷による「はじき出し損傷効果」などに分類され、これらの影響は半導体デバイスの材料や構造、回路構成、製造プロセスにより異なることが知られています。このため開発した検出器やASICがどの程度の放射線耐性を持つのか実際に放射線を照射して調べ、より放射線に強いエレクトロニクスを目指して研究開発を行っています。

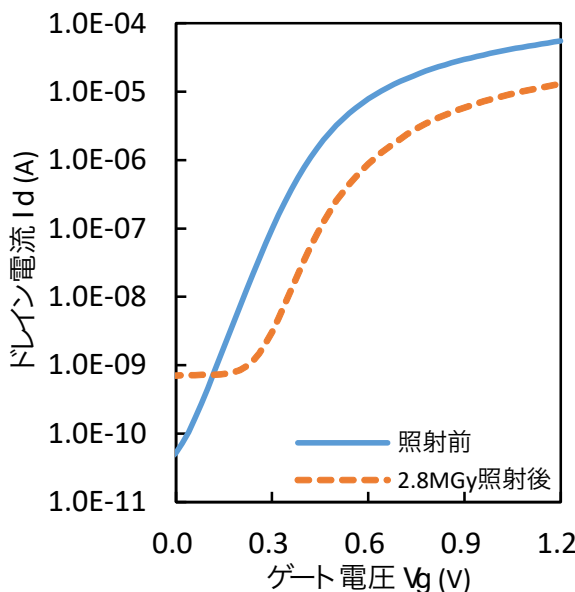


図2：ガンマ線照射によるMOSトランジスタの電気特性（ I_d - V_g 特性）の変化。放射線照射前後の変化が小さいものほど放射線に強いことを示す。



図1：QST高崎研でのガンマ線照射試験の様子