

E-sys 活動報告

Status of electronics system group IPNS

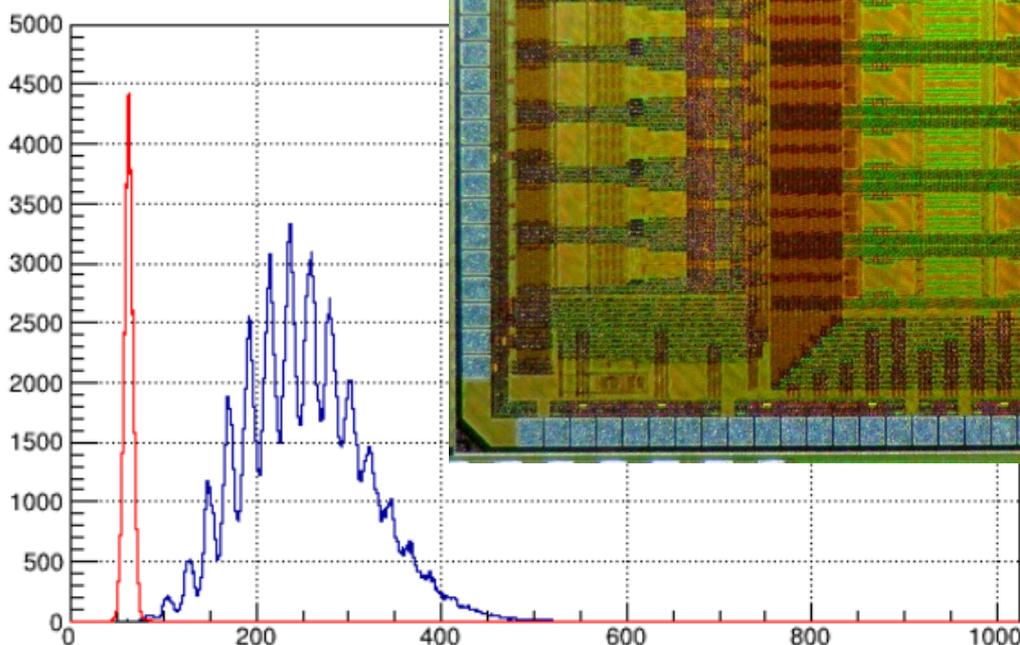


contents

- 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



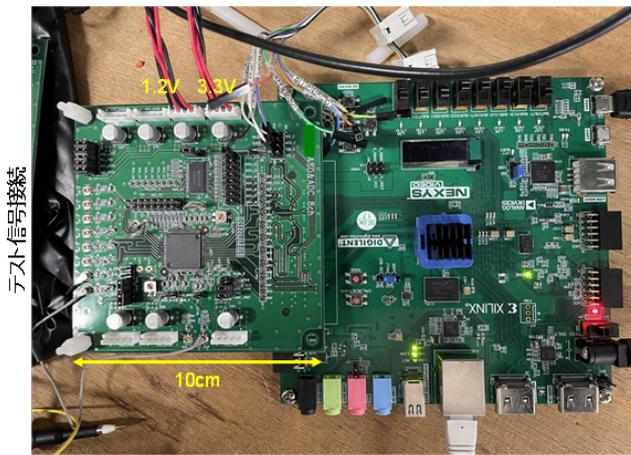
新たな現象や非常に稀な現象を捉えることを目標とする世界最先端の研究において、センサーや信号処理システム等の装置は世界に1つしか無いため自分自身で開発しなくてはなりません。エレクトロニクスシステムグループ(E-sys)では、このような世界に1点だけの実験装置のセンサーからシステムに至るまでを各実験グループと連携して開発し、それらをOpen-Itを通して知と技術の共有を行っています。



写真の説明：汎用MPPC信号デジタイザーASICの写真(右上)とMPPCとの接続試験結果(左下)。赤線はペダスタルで、青線はLEDを照射したときのデジタイザーASICでデジタル化された信号出力を積分してプロットしたもの。フォトン一つのピークが見えている。

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。技術特徴は半導体検出器・信号処理用エレクトロニクスの要素開発(集積回路・PCB)です。



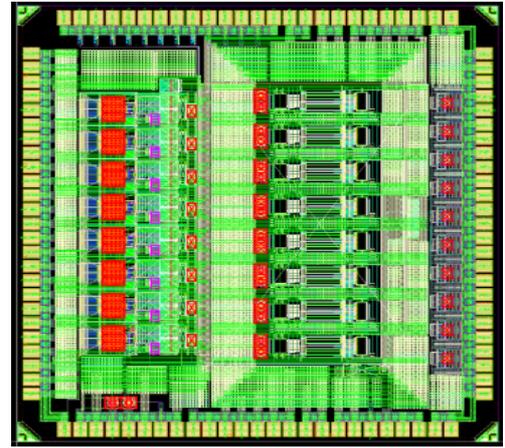
写真の説明： Belle-II CDCアップグレード用集積回路評価セットアップ。

プロジェクトへの貢献 E-sysつくば

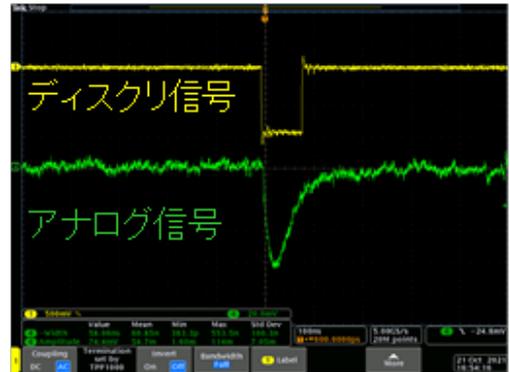
E-sysは拠点をつくばと東海に持っており、お互いに連携し両方のキャンパスで行われている実験プロジェクトに関する研究開発を行っています。その一つの例として今回はBelle-II CDCアップグレード用読み出しシステムの要素開発について現状を報告します。

Belle-II CDCの読み出しに必要とされるものは、衝突点から出てくる荷電粒子に対して、検出器内でのその粒子のエネルギー損失を測定できるアナログデジタル変換回路と1nsec程度の時間分解能を持つ時間測定回路です。

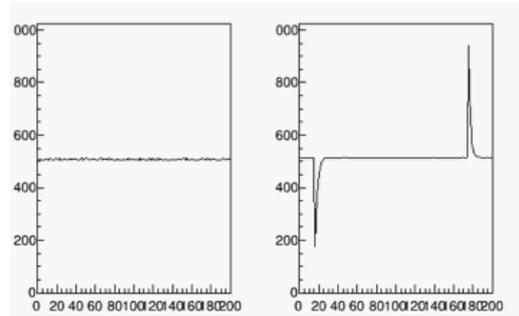
右上の集積回路(レイアウト)は、このために開発されたもので、内部に増幅回路、波形整形回路、



写真の説明：集積回路のレイアウト



写真の説明：時間測定回路用の出力信号（ディסקリ出力）とモニタ用出力でみた検出器からの信号（アナログ信号）



写真の説明：テストパルスを入力した時の集積回路の出力（右図：左図は入れていない時）。正しくアナログ信号がデジタル化されて出力されていることが確認できている。

コンパレータ、アナログデジタルコンバータ(ADC)等多くの回路が実装されています。今までにない特徴として、この集積回路は100MHzで動作する10bitのADCを全てのチャンネルに搭載しており、波形がリアルタイムで10nsec毎にデジタル化されて出力されることです。今後はこのような技術を使用することで、検出器上でデジタル化された信号がネットワークによってコンピュータへ転送する手法が主流になるでしょう。

現在東海分室と協力し、BELLE-IIに組み込めるように、FPGA内への時間測定回路の実装、トリガー信号生成ロジックやデータ転送制御用のロジック等を開発しているところです。

Esys東海では主にJ-PARC:現場で開発や改良が必要であることが多いデジタル技術を中心として研究開発を行いつつ、J-PARCセンター利用者が専門家と連携し研究開発を進めるため、共同利用実験室を設置し開発に必要な測定器などの機材も用意しており、毎日大学院生・若手研究者が利用しています。

技術特徴はASIC、FPGAに搭載するデジタル回路開発、10Gbpsを超える高速転送技術、データ収集システムの構築やデータ収集用プラットフォーム開発です。

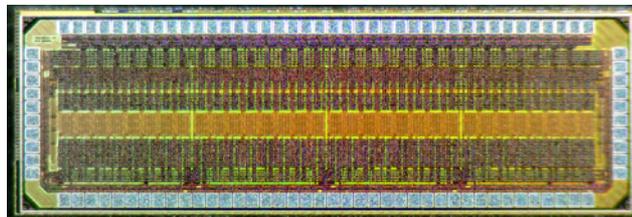
プロジェクトへの貢献 E-sys東海

今年度当初より技術職員の庄子さんを新たに東海勤務者として迎え東海分室常駐者の人数が4人に増えました。これに伴い研究開発場所が足りなくなったため所長、副所長やJ-PARCディビジョン長、セクション長等のご尽力により東海2号館に実験スペースを開設することができました。ここに感謝いたします。

前回はJ-PARC実験を支えるシステム開発の現状について報告しました。今回は要素開発に重点を置いて報告します。

東海分室では、J-PARCで行われる実験で、共通に必要な要素技術の開発をしており、今回の話題はマイクロパターンガス検出器(MPGD)信号処理用多チャンネル集積回路、MPPC信号デジタイザ、高精度トリガー・システムクロック分配回路です。このうち高精度トリガー・システムクロック分配回路はMIKUMARI(水分:みくまり)と名前がつけられた、CDCMというデジタル信号変調技術を使用した回路で、詳細は次ページの萌芽研究・技術開発で述べます。現在g-2/EDM実験に使用するために評価(右中写真)を行っており、近いうちに、特殊な送受信回路なしで、光ファイバー1本を使用し必要なデジタル信号が長距離転送できるようになります。

MPPC信号デジタイザASICは表紙の写真です。この集積回路は8チャンネルで全てのチャンネルにデジタイザを持っており10ビットのデジタル波形信号が出力されます。またタイミング信号もデジタル出力されるので、エネルギー情報と時間情報



写真の説明：マイクロパターンガス検出器信号処理用多チャンネル集積回路のレイアウト写真。32チャンネル処理できる。



写真の説明：g-2の試作ボード間でのMIKUMARIの接続試験の様子。違う回路間でCDCMの変調クロックからクロックを復元し同期が取れる事を確認した。



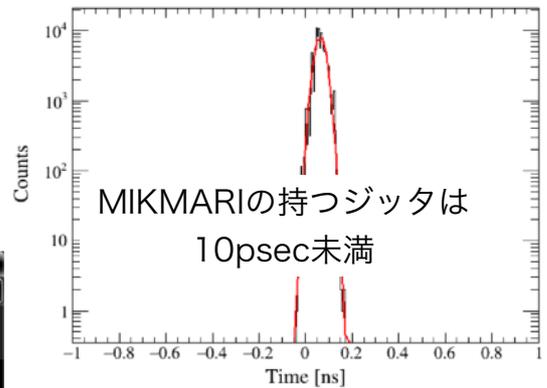
写真の説明：COMETグループと連携しAISTの協力を得てシリコンカーバイド(SiC)の半導体検出器を実験用センサーとして量産試作している。写真はAISTのクリーンルームで関係者の集合写真。

が同時に取得できます。開発のきっかけはE-sysが主催する研究会(今年は九州大学で開催され記事は教育とOJT・学際連携共同研究/開発で触れられています。)で複数のグループと協力し仕様を決定し開発することになったことからです。今後はMPPC用途ではこの集積回路が広く使われることとなります。

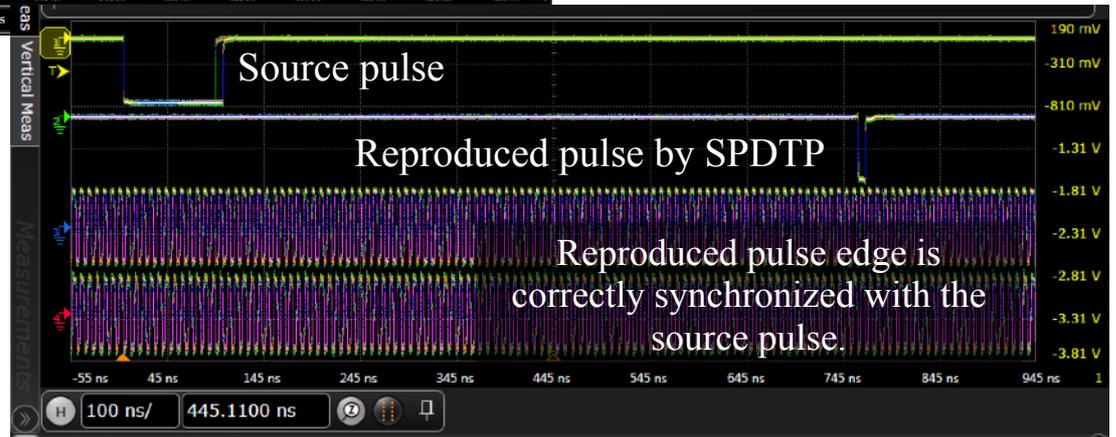
MPGD信号処理用多チャンネル集積回路(右上図)は、先に述べたMPPC信号デジタイザと同時期に開発が始まりました。J-PARCではガス検出器としてMPGDが使用されることは多く、読み出しには集積回路が必須であり、今後このような汎用集積回路開発が進んでいくことと思われます。

最後に前回報告したCOMET用ワイドギャップ半導体センサー開発についてですが、広報室多田さんに主導していただき <https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2022/01/20220120/> にわかりやすい記事としてまとめられました。お時間のある時にご覧いただくと幸いです。

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。



写真の説明：MIKMARIの持つ時間精度を測定した結果24psecであった。測定系の時間精度を除くとMIKMARIの持つ時間精度は10psec未満であった。これより高精度時間分配が可能であることがわかる。



写真の説明：左上写真はMIKMARIによりシステムクロックを転送し受信側でシステムクロックを正確に復元した結果を表す。右下写真は制御信号（例えばトリガー信号）を転送した例である。タイミング精度は10psec以下を維持して転送されている。

萌芽研究・技術開発

加速器の高強度・高輝度化により、検出素子の増加とそれに伴う測定装置の大型化が進んでいます。この巨大で多量のデジタルデータを生成する装置を制御するためには、距離が離れた複数の検出素子読み出し回路間において、それぞれが調和して動作するために良い精度で時間が揃っている必要があります（同期が取れているという）。この目的のために、実験では複数の基準同期デジタル信号を巨大な装置全体にわたって分配する必要があります。このデジタル信号分配システムは、精度が良いということは必須ですが、多くのデジタル信号を広範囲に送受信するために、使用するケーブルの本数も少なくかつできるだけ簡単に組み込める必要があります。我々はMIKMARIという基準信号プロトコルを提案しており、今回はこの研究開発ついて報告します。

MIKMARIは、CDCMデジタル変調技術をベースに開発された基準信号分配プロトコルで、その特徴は、多くの分配システムが必要としている特殊な復調変調回路が必要ないため、長期にわたる素粒子原子核実験においても開発維持が容易であることです。また光ファイバー一本で複数信号を送受信できることから装置の巨大化、センサーのチャンネル数の増加にも対応できます。

MIKMARIが送受信するデジタル信号の時間精度は、10psec未満で実験に使用するためには十分な性能を備えています。現在g-2/EDM実験の読み出しシステムに使用するためMIKMARIを組み込んだボードを開発しており、安定動作が確認されています。今後はJ-PARCの実験における標準的な基準信号分配プロトコルとして多くの実験で使用してもらうように開発を進めていきます。

教育とOJT・ 学際連携共 同研究/開発

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”を立ち上げ、教育活動及びOn the Job Trainingで若手教育と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。

詳細は<http://openit.kek.jp>参照

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。

今回は今までの教育に関する振り返りと、九州大学と連携して行った、ハイブリッド研究会の報告を行います。

Open-Itでは、2008年から多くの方に支えられつつセミナー、演習を行ってきておりそれらのいくつかは、総研大講義として認められ、他大学からも履修可能となり、高エネルギー加速器分野、放射光・中性子・ミュオン分野、宇宙線・天文・宇宙分野、工学分野の若手など幅広い分野から参加していただけるようになりました。

コロナの影響で、演習は開催を工夫しつつ行うことで、開催数は減りましたが、1回の開催で受講者数は増加し、2021年度は参加者が急激に増加しました。これは、リモート開催で多くの方達が参加しやすく

なったこと、量子ビームを利用した実験回数が増え実験技術習得に時間ができたなどの理由はあると思いますが、この増加は若手の技術獲得への熱意も増加している現れでもあり、今後の若手アクティビティーには期待しております。

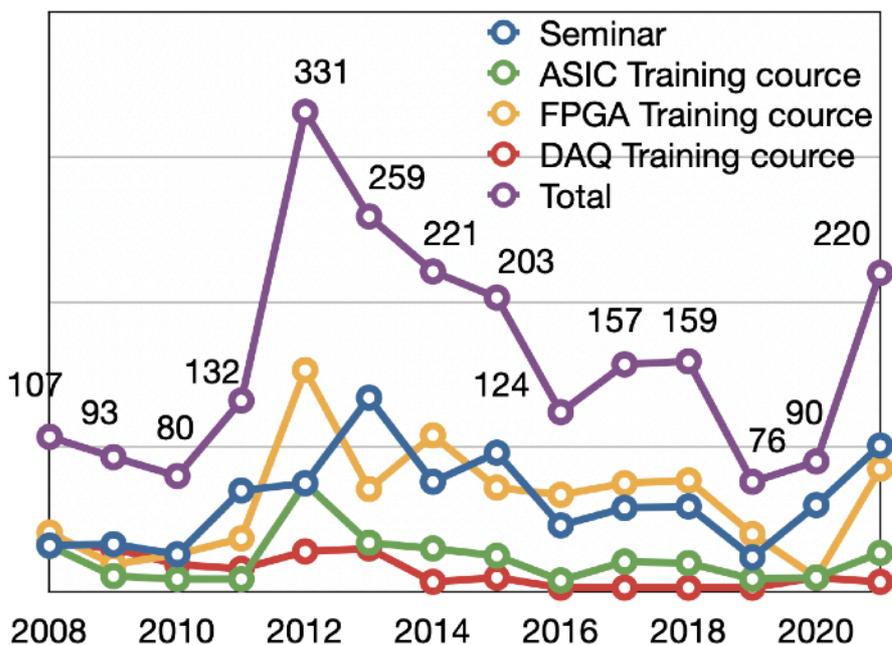
特にFPGAトレーニングコースは、初級だけでは不十分であるという多くの若手からの要望が増加したためFPGA中級トレーニングコースを1月27-28日の2日間開催し54名の盛況でした。来年度以降はこの中級コースは総研大のカリキュラムに組み込まれるため、他大学の単位認定も可能となります。

今年度は九州大学において計測システム研究会2021@九州大学～計測システム開発の現状と今後の展開～と題して登録者数90名で開催されました。プログラム等は<http://openit.kek.jp/workshop/2021/dsys/main> をご覧ください。

朝9時頃から夕方6時頃まで2カ所を繋いで発表と議論が行われました。分野としては、素粒子原子核宇宙だけでなく物性分野からも参加者があり幅広い視点から議論が行われました。



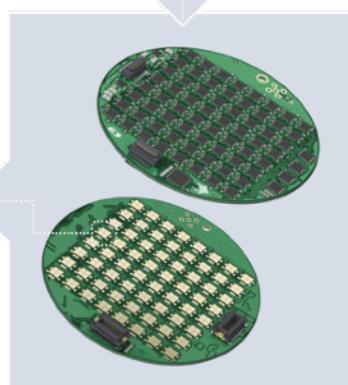
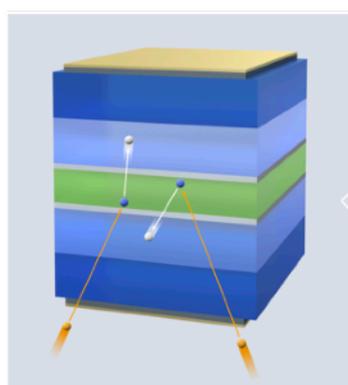
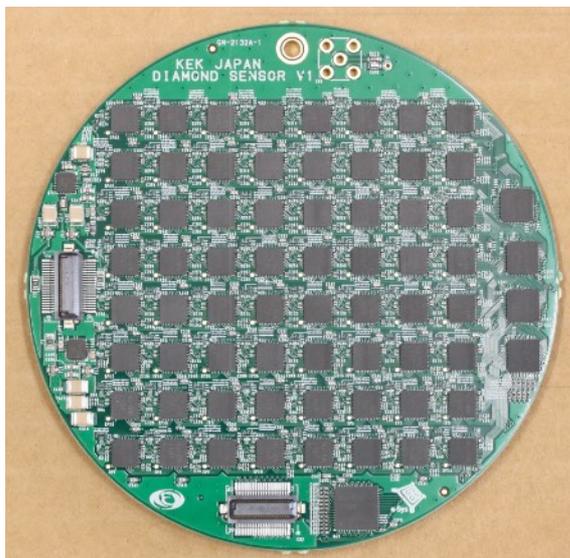
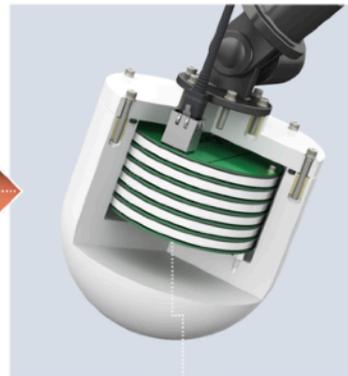
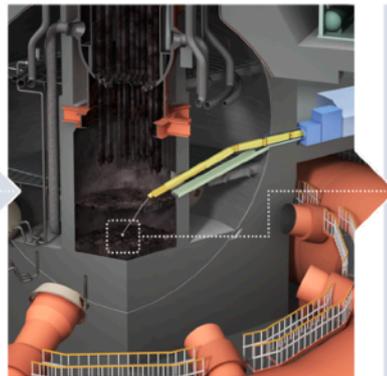
Open source consortium of Instrumentation



写真の説明：2008年から2021年までの、セミナー及びトレーニングコースに参加した人数の推移を横軸年度、縦軸参加者にしたグラフ。紫色が総参加者数の推移を示す。



写真の説明：計測システム研究会2021@九州大でリモート会場に集まった参加者の写真。リモートにも関わらず過発な議論や提案が行われた。



上図が未臨界モニターシステムの概略。実機は直径が10cm程度の穴から原子炉内に挿入されるため、形状及び重量の制限が非常に強い。また数千チャンネルのダイヤモンド素子を使用した中性子検出器がアレイ状に配置されるため、消費電力についても注意して設計されている。左の写真はプロトタイプボード。

国際連携・社会貢献等

組織連携・社会貢献

2020年10月より英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(戦略的原子力共同研究プログラム)に採択され、**福島県の原子炉の廃炉事業の一環として、未臨界モニターシステムの開発を開始しています。**このプロジェクトの困難な点は、

- 1、高放射線耐性が必要である
- 2、数Mcpsを超える γ 線ノイズ環境下で微弱な中性子信号を検出すること
- 3、深い未臨界であることを判定すること

で、昨年度の成果報告書は <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2021-038.pdf> をご覧ください。

今年度は新たに、3については、ファインマニュアル法を使用することで、 γ 線/中性子比

国際連携

EUに申請していたイタリアの **Università degli Studi di Napoli Federico II (ナポリ大学)** との **学生交流事業 ERASMUS+ program** が採択され総研大とナポリ大学との連

が1の場合でも深い未臨界であることが判定できることが明らかになりました。

また高耐放射線性能に関しては、1MGy以上の耐放射線性能を持つ信号処理集積回路、データ転送集積回路をCMOS65nmプロセスを使用し開発しただけでなく、新たなプロセスとしてCMOS22nm 及び28nmプロセスのトランジスタ評価を行うためのトランジスタ開発及び評価治具の開発を行い、評価を開始しました。

2については、ダイヤモンド検出器製作プロセスを改良することで800Gy/hの環境まで動作することが確認でき、残念ながら我々の開発した集積回路を接続した試験は、300Gy/hまでの動作確認に止まりましたが、来年度1kGy/h(実際の環境と想定されている状況)の環境で試験を行い目標を達成する予定です。

携協定も結ばれつつあります。今後これらの連携をもとに、加速器科学分野での連携が広まるように交流を推進していきます。

データの収集システム の開発と将来

五十嵐 洋一



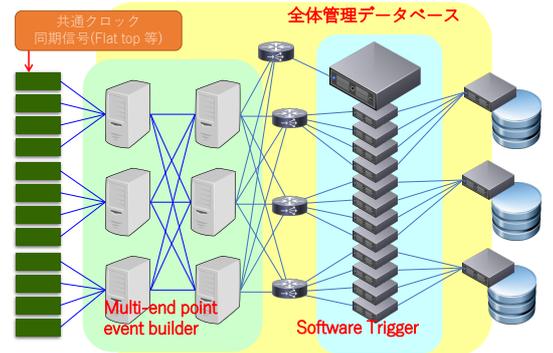
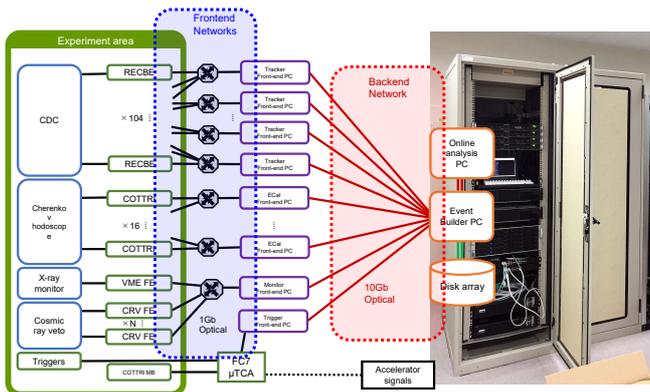
●五十嵐 洋一……E-sysの人

私は以下の2点を中心にネットワークを用いたデータ収集システムの研究開発を行っている。

一つ目は J-PARCで行われる COMET 実験のためのデータ収集システムの開発、構築である。この実験では数百のフロントエンド機器を用いて検出器信号を読みだす。そのフロントエンド機器からのデータを二階層のネットワークでデータを収集するシステムを設計し現在実装を行っている。ダミーデータを用いた評価試験では 830 MiB/s の速度でデータの収集が出来ることを示すことができた。

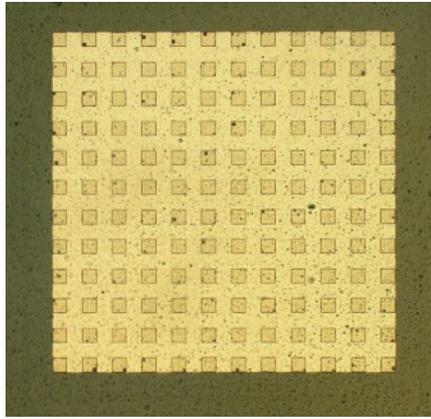
もう一つは将来の素粒子原子核実験に使用するためのストリーミング型のデータ収集システムの研究である。ストリーミング型データ収集システムはトリガー信号を用いずに検出器のチャンネル毎にデータを転送し、計算機ファームを用いてイベントの再構築、バックグラウンドの除去などのデータの削減などを行う手法である。十分な計算資源があればデッドタイム無しで大量のデータの収集が可能となる。この手法を J-PARCで行われる実験で実現するため

に、ZeroMQ というメッセージキューを持った通信ライブラリや GSI FAIR ののために開発されている統合フレームワーク FairMQ の一部を用いて多数のプロセスが協調して動くデータ収集システムを構成し、キーバリュー型のデータベース redis を用いて全体を管理するようなシステムの研究開発を進めている。現在、ひな形的なものは動きだして動作検証や検出器試験での試行等を行っている。このようなシステムを実験に適用することでビームを最高の効率で使用する実験や検出器の最大性能を使い切るようなデータの取得が可能となると考えている。



藤田 陽一

耐放射線読み出し集積回路とセンサー



●藤田 陽一……E-sysの人

私はエレクトロニクスシステムグループ発足以来の技術職員です。当初より放射線検出器読み出し用エレクトロニクスの開発に携わっており、半導体プロセスのデバイス評価やウェハー評価用プローバ、設計 CAD といった開発環境の立ち上げに始まり、主として特定用途型アナログ集積回路 (ASIC) の設計、評価に従事してきました。過去には X 線および中性子線検出器読み出し用 CMOS ASIC の開発や、大阪大学と共同プロジェクトで次世代の投影型イメージング質量分析装置の開発に参加し、時間検知型 2 次元アレイ検出器の設計に携わりました。

現在は産業技術総合研究所との共同研究で耐放射線センサーとして期待されるシリコンカーバイド半導体検出器の開発に携わっています。シリコンカーバイドは究極の半導体と言われるダイヤモンドと製作とコストの面で有利な現在主流のシリ

コン各々の良い面を併せ持った材料ですが、高エネルギー物理の分野では実用に至っていません。したがって、試作センサーに放射線を当てて検出器として動作するかの検証から始めて、放射線を当てて壊れたり性能が変わったりしないかなどのテストを行っています。

当面の目標として、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で計画されている COMET 実験の Muon モニターへの採用を目指しています。この計画ではセンサーは通常よりも高い放射線量にさらされることが想定されており、現在主流のシリコンより高い耐性をもったセンサーの方が壊れにくく実験を続ける上で有利です。既に試作センサーが予定の放射線量を当てても性能に影響が出ないことが確認できたので、今後は小さいセンサーを多数基板上に 2 次元に配置して、実際の COMET 実験を想定し 20cm 角サイズの試作モニターを組み立ててテストを行う予定です。

