

# E-sys 活動報告

Status of electronics system group IPNS

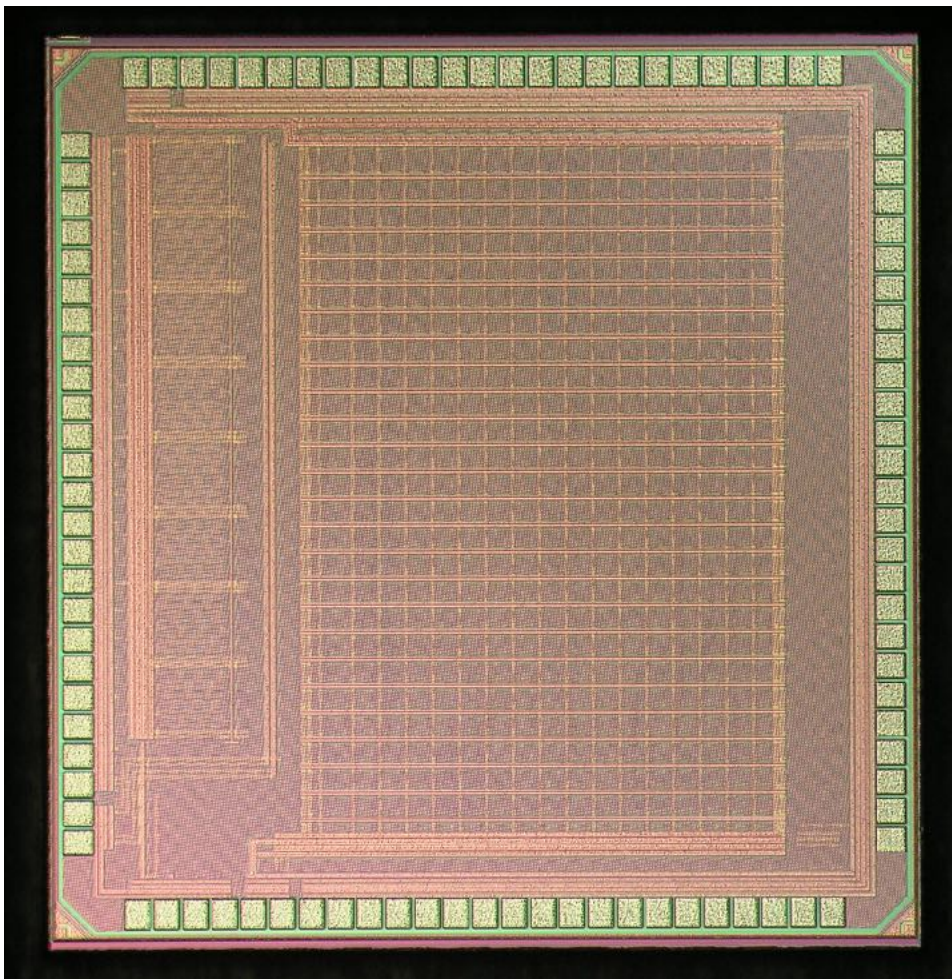


## contents

- 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・社会連携等
- E-sysの人



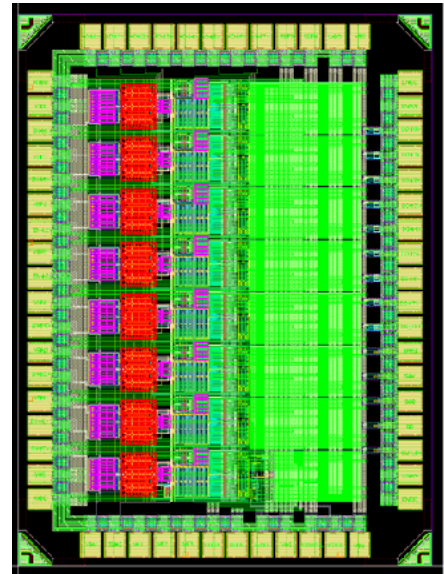
新たな現象や非常に稀な現象を捉えることを目標とする世界最先端の研究において、センサーや信号処理システム等の装置は世界に1つしか無いため自分自身で開発しなくてはなりません。エレクトロニクスグループでは、このような世界に1点だけの実験装置のセンサーからシステムに至るまでを各実験グループと連携して開発し、それらをOpen-Itを通して知と技術の共有を行っています。(SOIデバイスの開発に関しては、先端加速器報告を参照してください。)



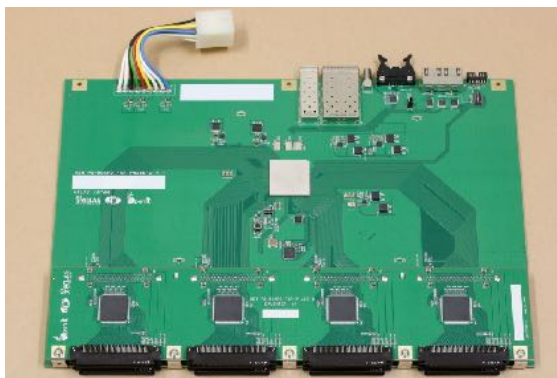
写真の説明：CMOS65nm半導体プロセスを使用して開発したアナログデジタル変換回路8チャンネル分のデータをネットワーク上へ転送できる集積回路(TCP-ADC)の顕微鏡写真です。転送速度は1Gbps(GbE)でアナログ値をデジタル変換した値をそのままネットワークに繋がれた機器(コンピュータなど)に送ることができるので、センサーからの信号データを収集することや色々な環境、制御モニター等のIoT化に応用ができます。この集積回路の大きさは2mm角で、従来のものに比べ1/100以下の面積の小型化が実現し、かつ消費電力も1/10以下の低消費電力に抑えられます。開発は濱田さん、宮原さん、内之八重さんが担当しています。応用にご興味がある方は是非ご連絡ください。

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。

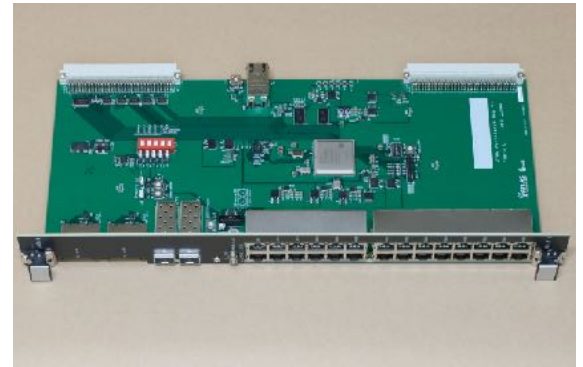
E-sysつくばは半導体検出器および信号処理用エレクトロニクスの要素開発(集積回路開発、PCB:Printed Circuit Board開発)に関しE-sys東海と連携し研究開発を推進しています。技術特徴は半導体検出器・信号処理用エレクトロニクスの要素開発(集積回路・PCB)です。



説明：上図はドリフトチェンバー用アンプ-シェーパー-ディスクリのレイアウト。Belle-IIのCDCやJ-PARC実験で使用されるドリフトチェンバー用に開発している。現在のBelle-IIで使用されている集積回路の置き換えを検討中である。詳細に関しては本文参照のこと。



写真の説明：PPASICを実装したATLAS実験用PSボード。量産が終了したPatch-Panel ASICを実装しており、現在評価中である。



写真の説明：上図はATLAS 実験用TGCフロントエンドFPGAを制御する、ZYNQ(CPU:ARMプロセッサが搭載されたFPGA)を使用したJATHubモジュールで、ソフトウェアを用いた複雑な処理が可能になっている。ディスプレイ、キーボード、ハードディスクがないコンピューターと同じであると思っていただければわかりやすい。

## プロジェクトへの貢献 E-sysつくば

今回は**ATLASグループ**用集積回路開発について主に説明しました。現在は集積回路開発は終了しボード(Printed Circuit Board:PCB)の開発を主に行っています。左の写真は前回紹介したPatch-Panel ASICと呼ばれる集積回路をのせたタイミング制御ボード(PSボード)です。また右下の写真はPSボード等に搭載されているFPGAを制御するためのボードです。これらはTGC(前回説明した検出器)のアップグレードに使用するため東京大、名古屋大、神戸大と連携し開発を進めています。

右上の図はドリフトチェンバー用の8チャンネルアンプ-シェーパー-ディスクリ(ASD)集積回路です。この集積回路は汎用性を持って開発されていますが、応用先として**Belle-II**のセントラルドリフトチェンバー

(CDC)や**J-PARC**で使用されているドリフトチェンバー読み出し用を使用することを考えています。現在はBelle-IIのCDCグループと協力し性能評価を行っており次に示す十分な性能を確認できています。

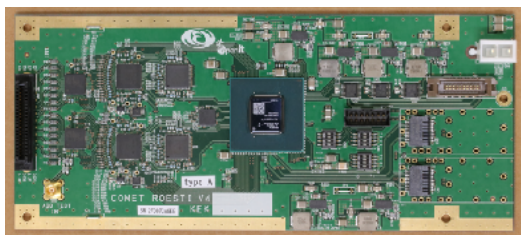
消費電力は現在使用している集積回路の3分の1、ノイズは半分となっており今後はチャンネル間ばらつきや検出器容量依存性等の評価を行いますますが現状のものでも通常用途には十分使用できます。

今後は前回紹介した8チャンネル100MHzADCと組み合わせたシステムASIC化や、現在開発中のpsec分解能TDCとの組み合わせなど**検出器のIoT化**をさらに進めていく予定です。



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、毎日数名の大学院生・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、1Gbps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。

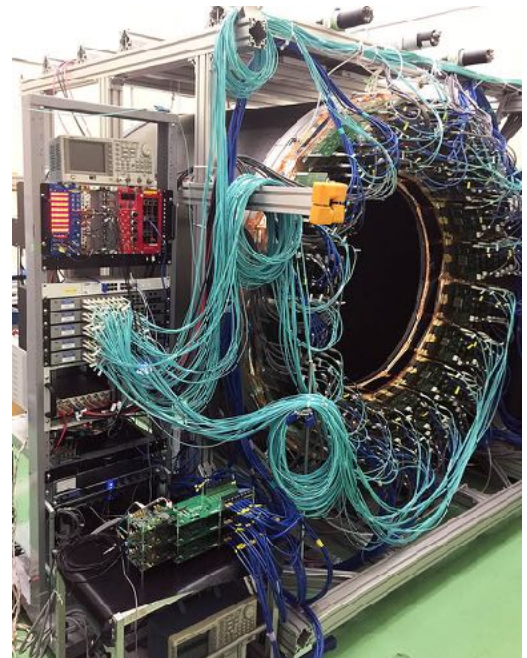


写真の説明：上の写真はCOMET実験ストロー飛跡検出器用読み出し回路(ROESTI)とデータ収集システムからの制御信号を分配するインターフェースボードです。

## プロジェクトへの貢献 E-sys東海

前任者に代わり2020年9月より新たに**東北大から着任した本多さんを東海分室室長**に迎え、T2K、COMET、E16、E40、E50、g-2、MLFミュオン実験などに加えて加速器グループとも連携を行いJ-PARCのアクティビティーを上げるために研究開発を行なっています。現在研究会の企画も含めたJ-PARCアクティビティーの更なる活性化を検討中ですので楽しみにしてください。

今回の研究開発の**トピックはCOMET実験**関連開発を取り上げます。COMET実験では、ミュオン粒子が電子に変換する事象を探索するために、国際協力で複数の検出器を用いており、E-sysも電子の飛跡を検出するためのガス検出器(ストローチューブ及びシリンドリカルドリフトチェンバー)の読み出しエレクトロニクス等の開発及びCOMET実験全体のデータ収集システムの構築更にはイクスティンクションモニターの研究開発を行なっています。



写真の説明：COMET円筒型ドリフトチェンバー(CDC)の宇宙線試験セットアップ。

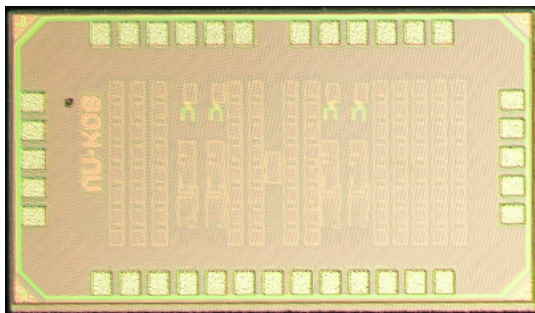


写真の説明：COMET データ収集システムの中心部であるコンピュータサーバーで、限られた予算内で実験に耐える速度(1GByte/sec)が出るように設計されている。

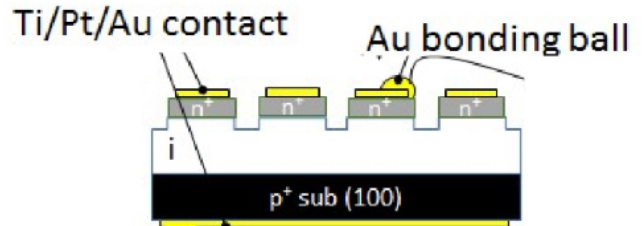
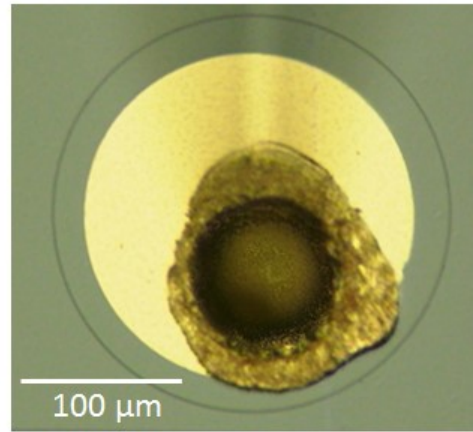
左の写真2枚はCOMET用に開発されたもので、上の回路は、検出器にガスを供給するためのガスマニホールドの中に設置されるため小型化やケーブル数削減を実現するため、高密度実装・デージーチェーン高速ネットワーク通信でデータ転送が可能な特徴を持っています。右の写真2枚はCOMETのデータ収集システムの準備状況を示したもので、**COMETでは予想しうる最大のデータ記録速度は毎秒1GByteであり、これはBelle-II実験と同程度の速度です。**この広帯域データ収集システムは五十嵐さん、千代さんが構築中です。

E-sys東海ではこのような取り組みに加えて、今後実験で取り扱うデータ量の増加に伴い、必要となる高速データ転送回路技術やPC上のソフトウェアデータ処理技術を積極的に進めていく予定です。

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  
 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：ダイヤモンドピクセルセンサー用低雑音信号処理集積回路。先端CMOSプロセス(最小配線幅65nmまでの微細トランジスタおよび金属配線が可能である)を使用し開発した。センサーとの接続試験等は終了し問題なく動作していることは確認できている。



写真の説明：物質・材料研究機構で開発されたダイヤモンドピクセルセンサー。円形の電極の上に接続用金バンプがのっている。下はセンサーの断面図で、p-i-n型構造でセンサーを構成している。CERNで使用しているセンサーと構造が異なり、より定電圧で高い検出効率を示す。NEW DIAMOND誌131号（2018.10発行）



写真の説明：水中ロボットへ組み込むための試験基板で大きさは約5cm x 10cmである。評価用のため評価端子がのっているが、実機では搭載しない。

## 萌芽研究・技術開発

耐放射線というキーワードは加速器の高強度化、高輝度化の流れの中でさらに重要性を増してきています。一方世の中を見渡してみると、同じキーワードが必要な分野がいくつか見つかります。その一つが**原子炉**です。我々は**放射線科学センター、物質・材料研究機構・海上技術安全研究所**と協力し、**ダイヤモンド中性子センサー・耐放射線集積回路を水中ロボットに搭載し冠水した燃料デブリの測定を行うためのシステムを研究開発**しています。

右上は物質・材料研究機構で開発されたダイヤモンドピクセルセンサーの写真とその断面図です。ダイヤモンドはワイドギャップ半導体であるため、シリコンと同様に放射線検出器を作ることができます。この検出器は他シリコンを使用した検出器と比較し、高温高放射線環境下で動作することが実証されています。左

上の写真はこのダイヤモンドセンサーの信号処理のために開発された集積回路です。ここで使用しているトランジスタは**最悪でも1MGyまで動作することが確認**されており、この集積回路自身の放射線耐性は今年中に評価を開始する予定です。一番下の写真はこの集積回路を実装した評価基板で、左端にダイヤモンドセンサーが実装され、集積回路からの信号は水中ロボット内の信号処理回路へ転送されます。現在この基板とダイヤモンドセンサー、水中ロボットそれぞれの接続試験は完了しており、今後全てを水中ロボットへ組み込み動作試験を行う予定です。

本研究開発は”英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業：課題解決型廃炉研究プログラム”にて推進されています。





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"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し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。  
前回は若手教育を中心としたOn the Job Training(OJT) ベースの研究開発について述べましたが、今回は初学者向けの教育について紹介します。特に今年はCOVID-19で大変でしたが、1) の講義は講師も含めリモート接続で行われました。参加者数は申込者だけで77名で、非常に盛況でした。また他大学開放の総研大講義ということで他大学学生からの単位申請も6人程度いらっしゃいました。一方演習については、対面方式とリモート方式の2種類で行われました。分子研で行われたデジタル集積回路の演習は、教材を使ってその場で設計等を体験するため、対面方式で行うことにし、関係者の努力により無事終了しました。アナログ集積回路設計とデータ収集ソフトウェアの演習は、リモート方式で行われそれぞれ10名程度の参加者で行われました。

# 教育とOJT・ 学際連携共 同研究/開発

2020 集中講義 計測と制御  
7/27~31 MON-FRI  
https://openit.kek.jp/training/2020/daq/home



写真の説明：センサー信号処理演習は、シミュレーションを中心にトランジスタ動作、アナログ回路の動作についてリモート講義を行った。

残念ながら今年度をもって1)~3)に関して機構のサポートは終了しますが、幸いな事に今回紹介した1)及び2)の一部の教育活動に関しては、総研大のコース群科目として継続できる目処がつき、総研大大学生だけでなく国内の大学に広く開放され引き続き多くの学生の聴講、単位取得が可能となっています。我々はどのような状況でも、加速器科学分野の若手のために活動を続けていこうと知恵を絞り活動を行っております。今後も進行中のプロジェクトはもちろんのこと、将来のためにも皆さんのサポートをお願い致します。



写真の説明：岡崎の分子研、土岐の核融合科学研と共同で開催している"デジタル制御計測演習(総研大講義)"で参加者を絞ってCOVID-19対応を徹底し、対面形式で開催した。

# 国際・社会連携等

## 組織連携・社会連携

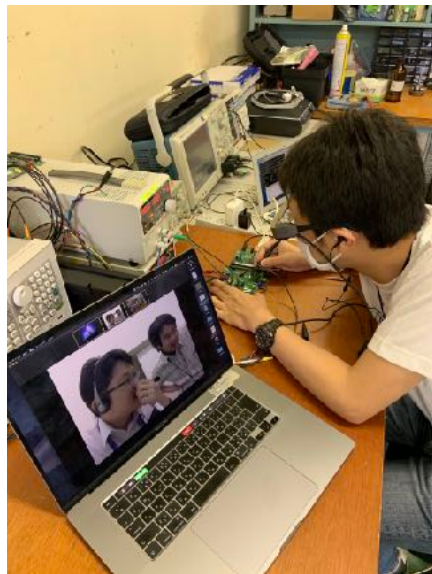
組織連携や社会連携の形態はCOVID-19の影響により大きく変わりつつあります。特に我々が行っていた活動の内、**体験型プログラム・演習・実習などは、通常の会議と異なり、遠隔会議装置だけでは開催が困難**です。そこで**スマートグラスの評価を行いリアルタイムで遠隔地の研究者、学生等とコミュニケーションできるシステム**を構築しその操作性などを調査しています。

苦勞している点は費用とリアルタイム応答性及び使いやすさの最適化です。現在では庄子さん、本多さんを中心としてOpen-It等

で共同研究者や学生とのコミュニケーションへ応用しています（写真参照のこと）が、これと汎用の小型可搬計測システムプラットフォームをマージすることで、開発からアウトソーシングまでシームレスに対応できる**“臨場感を有するリモート双方向連携プラットフォーム”の構築に展開**していきたいと思っています。これによって今までメールベースでリアルタイム性が欠如していた連携もより実践的でわかりやすかつ起きた問題を解決しやすい連携の構築が可能になると感じています。



スマートグラスとリモート会議用ソフトウェアを併用してボードのデバッグを東海キャンパスと連携して行っているところ。わかりやすい説明写真は右の写真を見てください。



左のパソコンに映った画面が、スマートグラスに映し出されている画像。スマートグラスのカメラの映像は東海キャンパスで見ることができ、音声も同時に聞こえるため、ハンズフリーでデバッグしながらリアルタイムに情報を共有している。



東海キャンパスでスマートグラスに映った画像をもとに状況を把握しアドバイスを行なっているところ。パソコンの画面には筑波キャンパスで作業者が見ている画面が映し出されており、画像音声情報を両方のキャンパスで共有している。

## 国際連携

COVID-19の影響でリモートで意思疎通を行う以上の連携はまだできていない状況ですが、グループとしてより良い国際連携のための基盤づくりをすることは可能です。例えば数年前にサマーインターンシップで我々のグループが受け入れたインドの学生は現在国費留学生として我々の共同で集積回路の開発を行っていますが、彼女の日々の研究活動は、教員だけでなく技術職員に

よっても支えられています。この環境の中、国際連携活動に接する機会の多くない技術職員でも英語を使いながら連携し開発をすることを、留学生との密な連携を通し、日々学んでいます。また事務補佐員も日常生活のケアや海外からの来訪者が戸惑うことについてのフォローなど多くを学びつつより国際連携がやりやすい環境を一緒に構築する努力をしています。



# 高密度半導体センサーと高集積化技術

岸下徹一



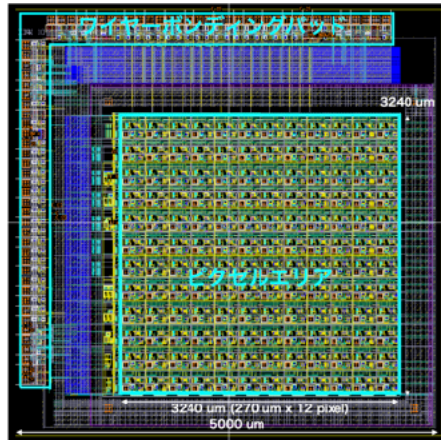
## ●岸下徹一……E-sysの人

彼の専門は、半導体検出センサーとその読み出し用集積回路設計で、本機構に着任する以前は、宇宙科学研究所においてX線天文衛星すざくに搭載する硬X線検出器の開発・評価に携わったのち、ポスドクとしてドイツ・ボン大学において、CERNのATLAS実験やKEKのBelle-II実験用ピクセル検出器(DEPFET)用の集積回路開発に携わってきました。

素粒子原子核実験においては、荷電粒子の飛跡をいかに精度良く検出し、再構成できるかが検出器の重要な性能指標となります。そのため、センサー1個あたりの面積は非常に小さいものを使い、粒子が通過するエリアに大量のセンサーを敷き詰めていくような構造になります。このような膨大な数のセンサーからの微弱信号を捉えるためには、信号を増幅し、雑音から切り分けるための高性能、か

つ超小型の読み出し回路が要求されます。

この読み出し回路は、最先端の半導体CMOSプロセスが用いて製造されますが、その設計はトランジスタの選択を始め、すべて自分たちの手で行います。実際の素粒子実験では、実験の要求に合わせて、信号を処理する回路の構成やパラメータを決め、数mm~数cm角の面積に数十から数百の読み出し回路を高密度に集積したICチップを作ることになります。現在彼は、KEKの進めるミュオンg-2/EDM実験で用いられるシリコンストリップ検出器の読み出し回路の設計に関わっており、量産に向けた試験が進んでいます。詳しくは<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2020/03/20200309/>をご覧ください。



上図はシリコン、シリコンカーバイト、ダイヤモンド等のピクセル検出器用のハイブリッドピクセル信号処理用集積回路のレイアウトで現在研究開発に使われているものである。



上図は共同開発者の学生に、現場で評価指導を行っているところ。

# デジタル回路集積化とネットワーク技術

濱田 英太郎

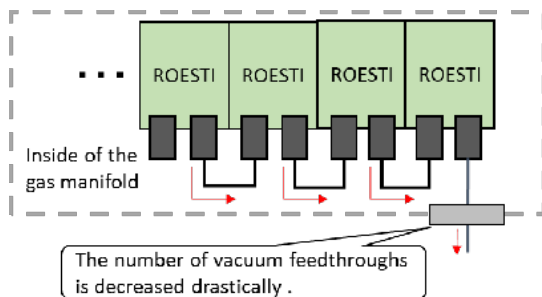


●濱田 英太郎 ……E-sysの人

彼はエレクトロニクスシステムグループに所属して8年目の技術職員です。これまで、様々な実験で利用される電子回路や集積回路の開発に携わってきました。中でも彼の強みはデジタル回路集積化とネットワーク技術です。素粒子原子核実験では、検出器の出力信号を求められる精度を満たすうえで読み出し、デジタル化を行い、信号データを正確にコンピュータに送る電子回路が求められます。このような電子回路開発において、彼はFPGAによるデジタル回路の集積化を行い、実験で求められる難易度な機能実現に貢献してきました。また、コンピュータが受信したデータをオンライン上でモニター・制御・解析・ストレージを行うソフトウェアの開発も行っています。

現在、彼はFPGAだけでなくASICによるデジタル回路の集積化も行っています。すでにg-2実験シリコン

ストリップ検出器用の集積回路(SiIT128)のデジタル部、Belle-II実験シリコンストリップ崩壊点検出器用の集積回路(SNAP128A)のデジタル部を設計し、低消費電力かつ低レイテンシ回路の実現にも貢献しています。この集積回路は今年度内にサブミットを予定されています。さらに、ADCとネットワーク機能が一体化した65nmプロセスによる新しい集積回路(TCP-ADC)の研究開発も進めております。この集積回路を利用することで、低消費電力、低面積、耐放射線のシステム構築を可能とさせます。これらのように今後も実験に要求される電子回路や集積回路を開発していくと同時に、低消費電力や多チャンネル化といった高機能化を目指す新しい集積回路の開発に取り掛かっていきます。このような成果をもとに日本の素粒子原子核実験におけるシステム高度化への貢献を期待されています。



デージーチェーン接続  
(数珠つなぎのような接続形式)

J-PARC COMET実験用ROESTI(3ページ目参照)で特徴的な技術：自動的にデージーチェーンのネットワーク接続を確立し1Gbpsの高速通信でデータをコンピュータに送る技術は濱田さんが完成させた。

