

# E-sys 活動報告

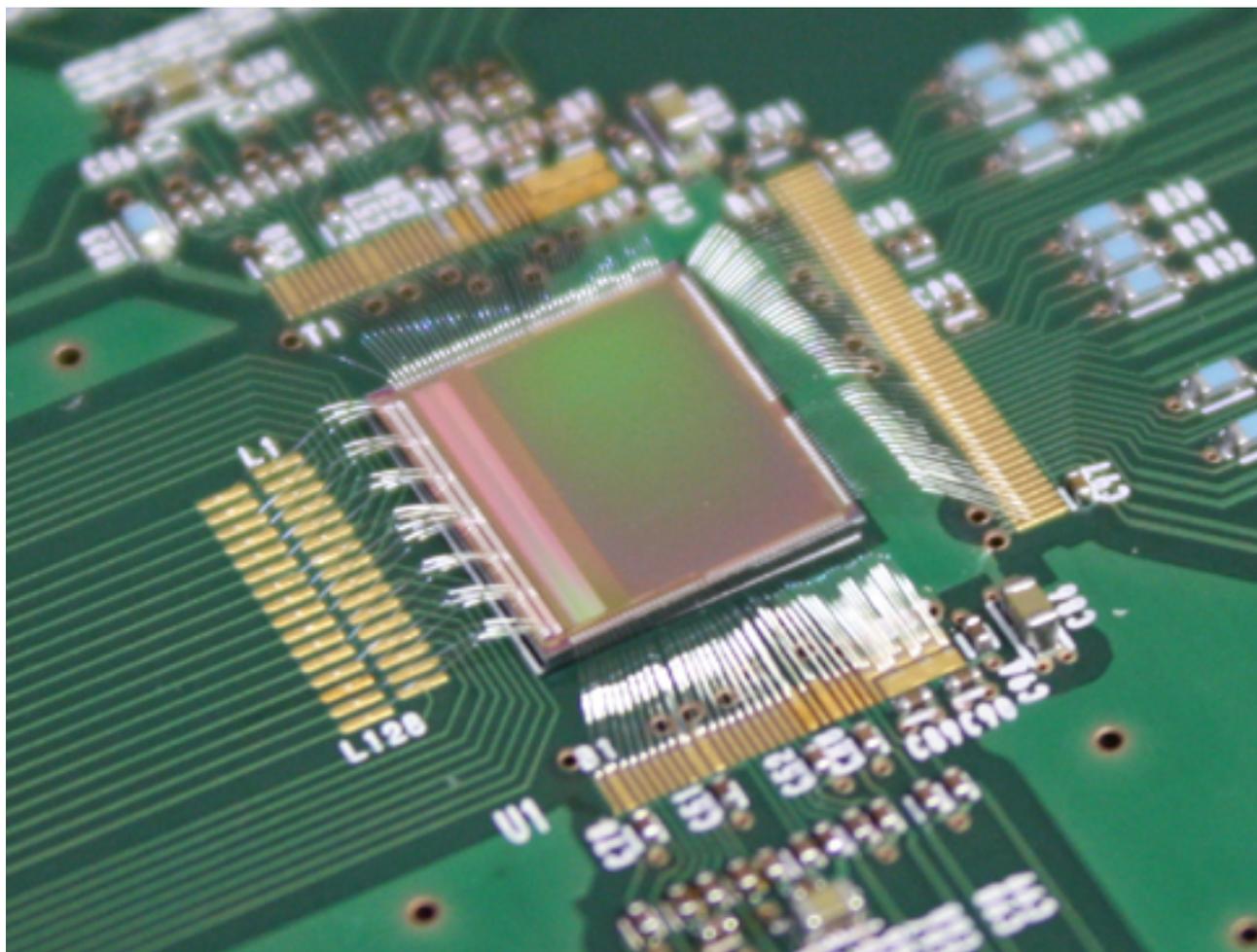
Status of electronics system group IPNS



## 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。）

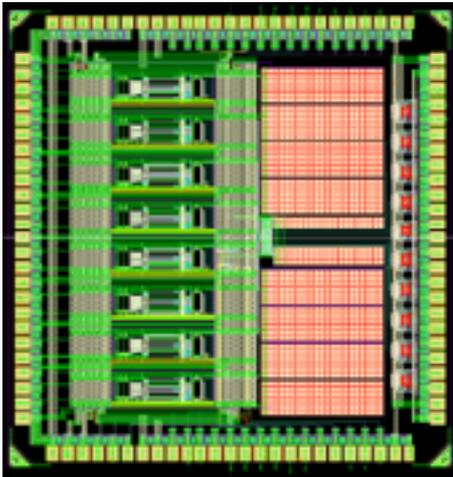


写真の説明：シリコン検出器用128チャンネル高速信号処理集積回路(SiIT)が基板実装されているところ。低消費電力、低雑音、多チャンネル、高ヒットレート対応が必須で、更にタイミングのふらつきは3nsec未満が要求されている。これらの要求を満たしつつチップ内でデジタルデータ処理を行うためのデジタル回路とデータ蓄積用メモリが搭載されている。このチップはJ-PARCで行われるg-2/EDM実験グループと共同でASICは岸下氏、PCBは庄子氏が中心となり開発している。

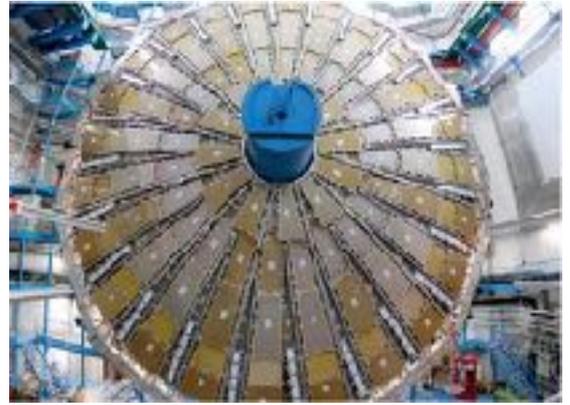
エレクトロニクスシステムグループ (E-sys) は、つくばキャンパス(E-sysつくば)と東海キャンパス(E-sys東海)の2カ所の開発拠点からなります。

E-sysつくばは半導体検出器およびその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)を中心として連携しつつ研究開発を行なっています。

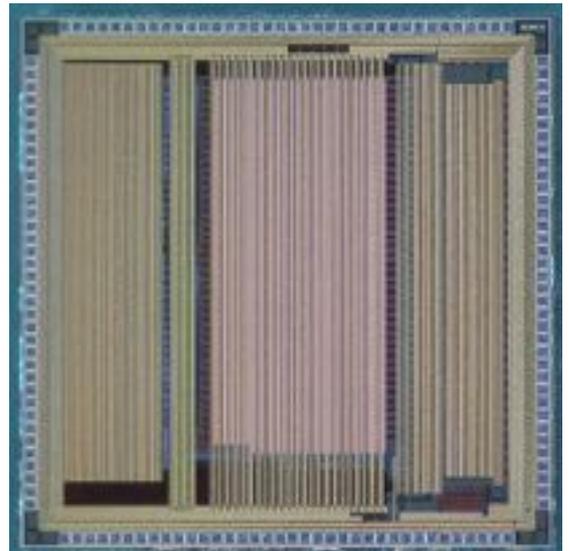
技術特徴は半導体検出器・信号処理用エレクトロニクスの要素開発(集積回路開発、PCB:PrintedCircuitBoard開発)です。



写真の説明：8チャンネル100MHzサンプル10bitADCのレイアウト図。CMOS65nmプロセスを使用し開発を行なった。



写真の説明：上図はATLAS検出器のエンドキャップ部で使用されるTGC検出器(直径約22m)の写真。下図はその信号処理に使用されるPP-ASICの量産バージョンの写真。詳細は本文を参照のこと。



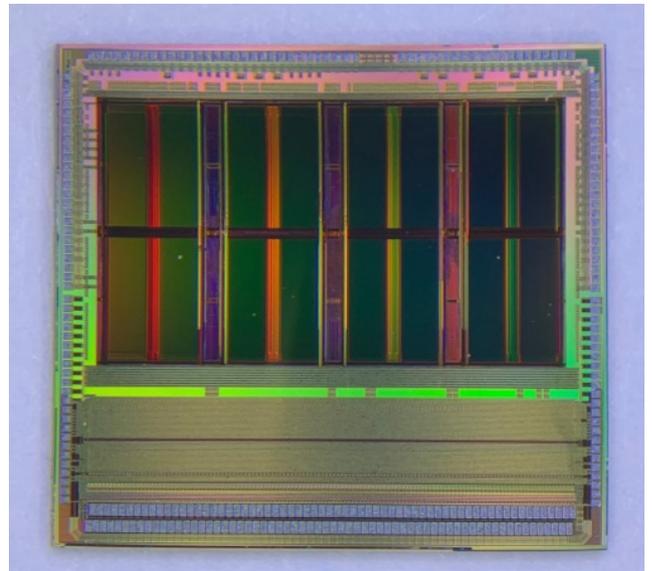
## プロジェクトへの貢献 E-sysつくば

ATLASグループ用の開発は、Patch-Panel ASIC(上部右下の写真)と呼ばれる集積回路をはじめPCB開発も含め多くのプロジェクトを行なっています。Patch-Panel ASICとはThinGapChamber(上部右上の写真)と呼ばれるATLAS最外層のミュオン飛跡検出器からの信号を受けてトリガー信号生成用のデジタル信号のタイミングを調整する機能を持っており、チャンネル数が32万チャンネルと多くそのすべてについて、PhaseLockedLoop(PLL)と呼ばれる機能回路を用いて実現しています。製造にあたってはCMOS180nmプロセスを利用し、従来用いられてきたASICと比較して面積は1/4以下、消費電力は約1/7、タイミングジッタも1/4以下の30psecを実現し歩留まり99%で量産を終了しました。この集積回路を実装したPCB関連の開発は今後も継続していく予定です。

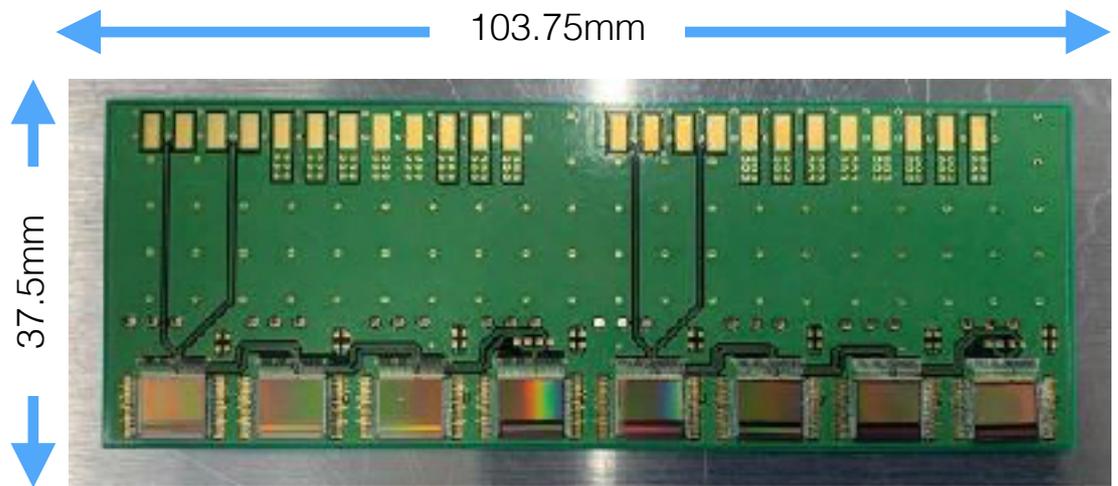
Belle-II検出器に関しては、8チャンネル100MHzサンプル10bitADC(左図を参照のこと)を開発中です。このADCはSAR-ADCと呼ばれるADCを基本として、その速度性能を向上させるために、アナログデジタル変換の並列化及び補間技術により従来の変換時間を約1/3にすることで高速化を実現しています。この集積回路の特徴は高速であるだけでなく、市販のADCと比較して、性能はそれを上回った状態で、消費電力を1/10程度にできていることです。現在Belle-II CDCグループと協力して評価を行なっています。今後更なる改良も含め、フロントエンド信号処理回路やTDCとの一体化などが検討されており、Belle-II以外の実験でも使用できるように検討する予定です。J-PARCでの実験に使用するための複数の集積回路、ボード開発および検出器開発に関しては、E-sys東海と連携を取りながら推進中で、それらの一部はE-sys東海の報告で述べます。

Esys東海では主にJ-PARCと言う実験現場で修正や開発が進められることが多いデジタル技術に関する研究開発を行い、J-PARCセンター利用者が専門家と連携して研究開発を進められるように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や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になります。



写真の説明：シリコン検出器用128チャンネル高速信号処理集積回路量産プロトタイプ(SliT128C)。



写真の説明：SliT128を実装した放熱評価テスト基板。出来るだけ価格を抑えつつも放熱や真空中へのアウトガス等にも注意しなくてはならない

## プロジェクトへの貢献

### E-sys東海

現在T2K、COMET、E16、E40、E50、g-2、MLF ミュー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。

今回はg-2/EDM実験関連開発を取り上げます。g-2実験では、ミューオン崩壊からの陽電子の飛跡を検出するためにシリコンストリップ検出器を使用します。この検出器（総チャンネル数：約65万）の読み出しを行うため新たに読み出しシステムを開発しなくてはなりません。センサーからの信号レートは平均でチャンネルあたり1MHzを超えるため、パルス幅を100 nsec未満にした上で、高S/Nの達成とtime walk 1nsec以下を達成しなくてはなりません。この要求を満たすために集積回路デザインの工夫を行い低消費電力を実現している、他には例を見ない集積回路になっています。（上図の写真および表紙の写真を参

照のこと）これらは真空中に設置されるため熱伝導のみで冷却しなくてはならず、低消費電力化はもちろんのことシステム全体の冷却効率も考えPCB基板のデザインや技術選定を行う必要があります。上図下の写真の基板の特徴としては、熱を効率良く逃がすためにASIC裏面を下層まで接続した放熱パッドにしたこと、ビルドアップ工法を用いた多層基板なので、基板の総厚が約400μmと通常の基板の数分の一で薄く、セラミックなどの材料を使用せず高熱伝導を実現していることです。このため価格も安く抑えられています。

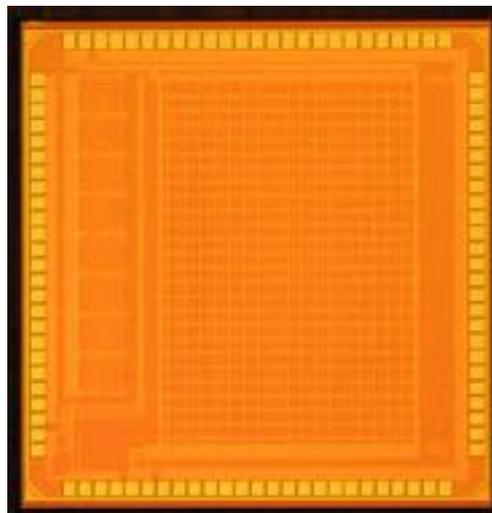
E-sys東海ではこのような取り組みに加えて、今後実験で取り扱うデータ量の増加に伴い、必要となる高速データ転送回路技術やPC上のソフトウェアデータ処理技術を積極的に進めていく予定です。

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。

我々は長期的視点に立ってセンサーを含む  
 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：GUNMAD:ダイヤモンド検出器読み出し  
 用集積回路。応用範囲が広いためダイヤモンド以外  
 にCdTe等の半導体検出器読み出し評価にも使用検討  
 をしており、東北大学、茨城大学などと連携し研究  
 開発を予定している。



写真の説明：ネットワークデータ転送機能を持つ8チャンネル  
 ADC集積回路(ADC-SiTCP)。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  
 能である詳細は本文を参照のこと



写真の説明：LTARS:ワイドダイナミックレンジ低雑音フロントエンド集積  
 回路とその評価基板で、神戸大学および岩手大学と協力して評価を進めて  
 いる。

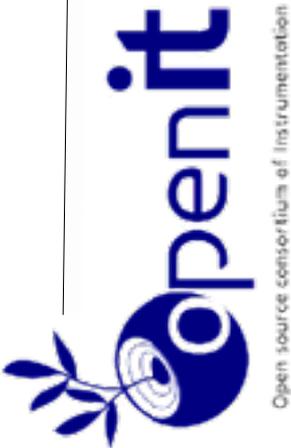
## 萌芽研究・技術開発

我々は加速器科学における計測技術を先導するため  
 65nm~350nmCMOSプロセスを使用しASIC(特定  
 用途集積回路)の開発を行いつつ高集積、高機能、広  
 帯域計測技術の蓄積を行いつつ、それらの実用化を推  
 進し世界をリードすることを念頭に研究をしている。  
 現在放射線科学センターと協力し数MGy(数百Mrad)  
 まで動作可能なセンサー用信号処理集積回路を開発し  
 ており1MGyまでトランジスタと回路要素の動作を確  
 認している。今後10MGyを目標に照射評価を継続さ  
 せる。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”にて推進されている。詳細は別の機会に報告する  
 予定である。

このプロセスを用いてアナログデジタルコンバータの  
 変換結果を直接ネットワークに転送できる集積回路

(ADC-SiTCP)の開発を行なっている。この集積回路  
 を使用することで大きさだけでなく消費電力や耐放射  
 線特性等が改善されたシステムが構築でき、素粒子原  
 子核実験以外にも加速器等広範囲に分散したデータを  
 ネットワークで収集するための有用なIoT要素技術と  
 なる。

センサーに関しても、ワイドギャップ半導体のピクセル  
 センサー（上図左の写真は群馬大学等と共同開発し  
 ているダイヤモンドセンサー用ASIC:GUNMAD)や液  
 体アルゴン検出器および暗黒物質検出用TPC検出器用  
 のワイドダイナミックレンジ低雑音フロントエンド集  
 積回路（上図右下の写真は神戸大学、岩手大学と共同  
 開発している前述の集積回路と評価基板）を開発して  
 おり、今後それらの結果を逐次報告予定です。



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) これから計測技術を学ぶ初学者向けの計測技術教育。
  - 2) その教育を受けた若手が装置開発を学びながら実践で用いる装置開発を行う共同研究開発。
  - 3) 最後に装置開発を進めている開発者が情報交換するための場として研究会などの交流の場に参加することができます。
- 今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す。現在複数のOJTベース研究開発が行われていますが(下記の写真は本文を書いているときに来所していた学生さん達の写真を撮ったものです。それぞれ、前章で説明した集積回路開発評価を共同で行なっています。)傾向として当初素粒子原子核実験内が主だっ

# 教育とOJT・ 学際連携共 同研究/開発

た連携が他の自然科学や工学の分野に以前より拡大しつつあります。また多くはありませんが、その中でOpen-It若手の会などを利用し分野を超えて学生や教員間で開発連携が進んでいるのは喜ばしいことです。いくつか気になる点も出ています。その中で一番重要なものは、多くの分野でセンサーを含む計測システムを構築するための基礎知識教育とその実践の機会が少ないことについてです。大学によっては科目そのものがない場合もあり、系統的に教育を行うための方策を検討中です。また学生実験ではなく学生が自身の研究として認識し研究開発を行う方が得られるものも多いということは明らかで、このようなOJTの機会を有効に使うにはどうするべきかは今後の検討事項です。これらは我々の少ないマンパワーのみでは解決できず皆さんの協力が必要と考えており今後ともご協力をお願い致します。



群馬大  
小林泰己 君(M1)

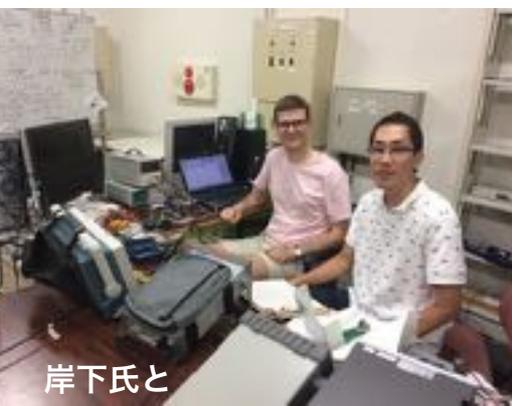


岩手大学: 奥側 五十嵐大翔 君(M2)  
手前 李沢祥太 君(M1)

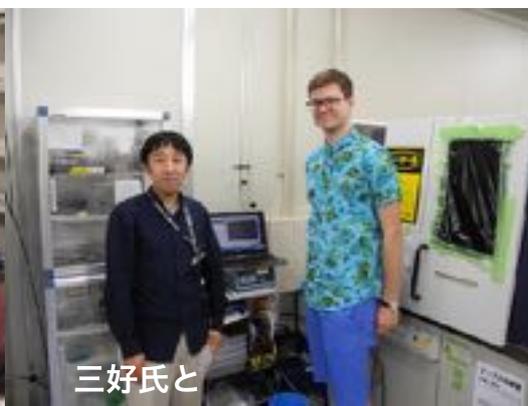
## 海外学生受け入れ

残念ながらOpen-Itで行われている連携開発プログラムに関しては、外為法等の外的要因により生じる知財及び成果物の取り扱いが容易ではないため国際連携へ展開が困難ですが、教育プログラムと交流プログラムに関しては可能です。我々は、KEKや総研大インターシップ及び我々グループに直接コンタクトを取ることなどにより来所する国内外の大学生や、高専生に対して種々の教育を行なっています。下記の写真は今年度SOKENDAI KEK Tsukuba/J-PARC Summer Student Program2019で来所したGilbertas

Umbražūnasさん(ケンブリッジ大学)と担当教員との写真です。彼は半導体センサーの基礎、ハイブリッドピクセル検出器の評価、モノリシックピクセル検出器の評価及びCOMET実験用データ収集システムの開発の3つの課題におよそ2ヶ月と取り組みました。このような活動を続けてきた結果、海外の学生が総研大を留学先に選択してくれるようになり、現在一名我々のグループでも研究活動を行なってくれています。その学生については次回以降紹介したいと思います。



岸下氏と



三好氏と



五十嵐氏と

# 国際・社会連携等

## 国際連携

今年度、イタリアの複数の研究教育機関（The University of Naples Federico II, The Istituto Nazionale di Fisica Nucleare and The Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia, CNR）と日本の研究機関（KEK素粒子原子核研究所及び物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクニクス研究拠点及び機能性材料研究拠点）が基礎科学から生物及び医学応用なども含めた放射線及び粒子線センサー開発に関してMOUを結びました。それに基づき研究者同士で交流を行っており、今後各国において外部資金等を使用しつつ研究開発と交流を行っていきます。（写真はNIMSにてセンサー用途に使われている機能性材料や日本において研究段階の nano

materialを使用したセンサーなどの研究開発の現状説明を行っているところです。）現在NIMS等へ学生及びポストドクが滞在し、共同で研究開発を行う予定で検討が進んでいます。さらにこのコミュニティーに山形大学・有機エレクトロニクス研究センターも興味を示しており、来年度協力関係に関して議論をする予定です。

これ以外にも、ドイツボン大学のシリコンピクセルセンサーや集積回路開発を行なっている研究室やフランスエコールポリテクニクのmicroelectronics design centerとも研究者交流が行われており、今後このような連携を通して新しい研究開発連携を創出していく予定です。



## 社会連携

国内の若手研究者が中心となってOpen-Itで蓄積したノウハウを基にアウトリーチ用小型可搬計測システムを開発することから始まったプロジェクトは、広報担当者の協力を得つつ、総研大、IPNS、KEKのサポートで高校生や一般の方達を対象に科学実験イベントとして開催され始めました。（左のポスターは、長野県飯田市において開催された時のものです。下の写真は運営スタッフと参加者の写真です。詳細は<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2019/11/20191107/>をご覧ください）

今後小型可搬な汎用計測プラットフォームを構築することで、多種多様な”自然を見る実験”をより簡単に体験してもらうことで、我々の行なっていることを知ってもらい、同時にKEK、総研大の知名度をさらに上げていきたいと思っています。次回以降このプラットフォームの開発の話も報告していきたいと思っています。



# 微細半導体プロセスと センサの高機能化

宮原 正也



## ●宮原正也……E-sysの人

彼の専門は電気電子工学で本職に着く前は、東京工業大学で超微細半導体CMOSプロセスを使用してミリ波帯の無線送受システムの集積回路開発や超低消費電力センシング用信号処理集積回路の開発を行っていました。

その頃アナログデジタルコンバータ(ADC)分野では、彼の名前は広く知られておりいくつかのプロジェクトで重要な役割を担っていました。(ADCとは、アナログ信号をデジタル信号に変換する機能を持つ回路です。詳細は後述しています。)

現在の社会にはコンピュータが溢れそこではデジタル信号が使われます。一方我々を取り巻く環境からの情報はアナログです。この二つをつなぐ役割をするのがアナログデジタルコンバータに代表されるデジタルコンバータです。その中には皆さんの知っているTime-to-Digital converter (TDC)なども含まれています。

素粒子原子核実験では実験中に多くのセンサーからの信号を処理し、コンピューターへ送る必要があります。この機能はどのような計測システムでも必要であり、以前は商用のADCなどを使用していました。しかし近年一つの実験で使用するセンサーのチャンネル密度が増加し、商用のADCでは高集積化が困難でありかつ消費電力が増加します。更にADCへの要求仕様も市販の集積回路では満たせなくなってきたため、独自開発が必須となってきており、世界中の高エネルギー加速器コミュニティーで開発が進められています。しかしながらADCの開発は仕

様とその実現方法に多くのバリエーションがあること、回路の複雑性による複数の回路パラメータの最適化が困難であること、などにより簡単ではなく欧米では我々の分野でデジタルコンバータを含んだシステムの集積化はそれほど進んでいません。

現在彼は、複数の実験用にADC、TDCを開発しているだけでなく、種々の実験にカスタマイズ可能な汎用のADCの開発や関連技術も並行して進めています。開発された一部のADCは放射線耐性や性能がすでに確かめられており、種々のセンサー読み出しシステムへ組み込まれる予定です。今後これらの成果をもとに日本の素粒子原子核実験研究者のビジビリーを、更に高めていくことが予想できます。またこのような技術は産業分野で進んでいるIoTやAI技術の発展にも役立つでしょう。<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2018/06/18/1100/>

アナログデジタルコンバータはなぜ重要か：現在の高輝度高強度加速器実験環境下では、読み出しシステムの集積化が必須であり、ASIC(Application Specific IC)にADC等のデジタイザを組み込むことで集積化が進むだけでなくセンサー付近でデータ処理を行うことでSN比の向上やデータ量の圧縮が可能になる。一方センサー近傍に設置する集積回路の発熱などにより問題が起きないように、様々なアイデアを用いてADC等の性能を向上させつつ、消費電力を減らすことは必須であり、このような研究開発は今後も世界中でしのぎを削って行われる。



大阪市立大学の山村晴菜さん(M2)にBelle-II用100MHz10bitADC(プロジェクトへの貢献で触れている)評価について指導を行なっている。

# 新しいダイヤモンドセンサーを蓄積して



● M. Jauhr Kholili ……E-sysの人

彼がインドネシアから総研大に入ったのは3年前。今年9月にめでたく博士号を取得し帰国しました。

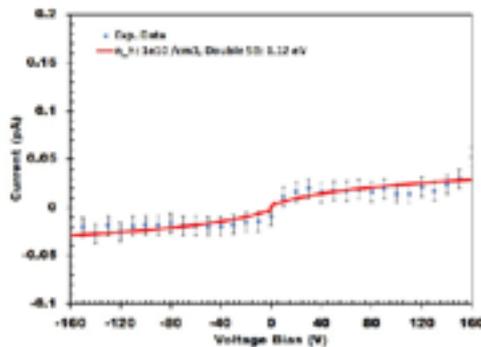
彼が行ったのは、今まで手につけられてなかったダイヤモンドセンサーの定量的なモデルの構築とそれをを用いた新しいダイヤモンドセンサーの提案です。(なぜダイヤモンドセンサーかについてはこの文章の最後に説明をつけましたので気になる方はお読みください。) その新しいセンサーというのは内部増幅機能を持ったセンサーです。ダイヤモンドを用いたセンサー開発プロセスは、シリコン半導体のように確立していないため経験によるところがあり、改良点を探るためには定量的なモデルの開発が必須でしたが当時は世の中には全く存在しませんでした。

そこで彼はダイヤモンド検出器およびその読み出し回路 (GHzを超える速度を持つためデザインは簡単ではありません) を独自開発し、種々の手法を使い丁寧にパラメータ測定を行い、最終的にどのようなパラメータがセンサー特性に重要かを明確にして、センサーの動作を静特性(I-Vカーブなど) から動特性 (信号波形など) および信号収集効率など主要特性を系統的に定量的に再現できるTCADモデルを確立しました。

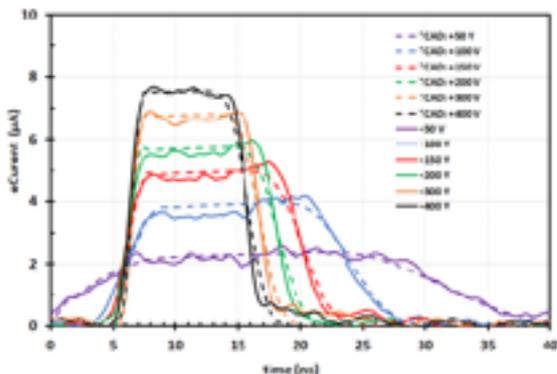
このモデルをベースとして、電解集中を起こすセンサー形状等複数の提案を行い、現在その研究が進んでいます。彼の研究の中で彼はセンサー開発だけでなく、ダイヤモンドセンサー信号の高速読み出し集積回路を開発し今後ダイヤモンドセンサーを実験へ応用するときの必要な要素技術も確立しました。これらは国際会議で発表され、それに触発された海外のダイヤモンド研究者が彼のプレゼンの後に何人も集まり、白板を利用して議論始めた時のことを今でも思い出します。とても感慨深い光景でした。

ダイヤモンドはなぜ重要か：ワイドギャップ半導体であるため熱励起でe-hペアが発生しにくく、リーク電流密度を小さくできる。また誘電率が小さく検出器容量が小さい。この二つによりセンサーノイズを他の材料より小さくできる。また電子、正孔の移動度が速いため高レート実験に向き、現在の高輝度高強度加速器実験環境下での半導体センサー材料としては他の半導体材料を凌駕する性能を持つ。しかしながら生成信号量がシリコンなどと比較し小さい欠点を持つが、センサー自身に増幅機能を持たせればその欠点を補える。

神山研究科長と学位授与式で



I-V特性：データとシミュレーション値



検出器からの信号波形のバイアス電圧依存性：実線がデータで、破線がシミュレーション

