

2017 年度 Open-It 活動報告

KEK 素粒子原子核研究所

内田 智久
uchida@post.kek.jp

佐藤 優太郎
syutaro@post.kek.jp

岡山大学大学院数理物理学専攻

彌益 紗希
yamasu@s.okayama-u.ac.jp

名古屋大学宇宙地球環境研究所

佐々井 義矩
sasaiyoshinori@isee.nagoya-u.ac.jp

他 Open-It 世話人会

2018 年 5 月 2 日

1 はじめに

Open-It は有志により運営されている計測システム技術の専門家ネットワークである[1-8]。計測技術教育と装置開発により加速器科学とその周辺領域に貢献することを目的に組織を超えた連携により活動している。本報告では活動報告を最初に行い、その後で装置開発プロジェクトを 3 件紹介する。各文章と執筆担当者は以下の通りである。

- 2017 年度 Open-It 活動報告 (内田, Open-It 世話人会¹⁾)
- 開発プロジェクト紹介
 - J-PARC muon g-2/EDM 実験のためのシリコンストリップ検出器用読み出し ASIC “SliT” の開発 (佐藤) [9-11]
 - J-PARC T2K 実験における陽子ビーム位置検出回路の開発 (彌益) [12]
 - 新型太陽中性子望遠鏡 SciCRT のための高速読み出し用バックエンドボードの開発 (佐々井) [13]

育と計測機器開発を機関の垣根を超えた連携により進めている。このことから分かるように Open-It の活動を表すキーワードは「教育」と「連携」である。

技術教育に関しては特に将来を担う学生や若手研究者を対象に、連携に関しては既に計測機器開発で活躍している研究者や技術者を主な対象にしている。活動を表すキーワードである「教育」と「連携」の二つを独立に進めるのではなく融合させながら進めている点が特徴である。現在の具体的な活動を下にキーワードを添えて示す。

- 【教育】計測技術教育
- 【教育】【連携】共同研究開発
- 【連携】交流のための場の提供

上の活動は相互に接続されている。これから計測技術を学ぶ初学者向けの計測技術教育。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。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る。以降でそれぞれの活動について報告する。

2 2017 年度 Open-It 活動報告

2.1 Open-It 活動概要

Open-It は加速器科学とその周辺分野の計測機器開発に関する問題点を解決するために 2010 年に活動を始めた。その問題点とは専門分野の細分化による学生や若手研究者の計測技術教育を受ける機会の減少と計測技術の高度化による様々な開発資源不足である。その問題を解決すべく技術教

2.2 計測技術教育

中心となる教育プログラムは基礎知識を習得するための講義形式のセミナーと実践的な知識を習得するための実習形式のトレーニングコースの 2 種類である。講義内容は修士課程で実験系物理学を学ぶ学生が理解できる難易度に設定している。また、誰でも受講することができ、社会人も受け入れているセミナーやトレーニングコースもある。

¹ 活動に賛同している有志により構成されており、活動内容や方向性などの議論を行っている。構成員：(五十音順)：味村周平 (阪大)、阿部利徳 (理研播磨)、石徹白晃治 (東北大)、内田智久 (KEK)、窪秀利 (京大)、小嶋健児 (KEK)、東城順治 (九

大)、戸本誠 (名大)、長坂康史 (広工大)、花垣和則 (KEK)、早戸良成 (東大)、房安貴弘 (佐賀大)、宮原正也 (KEK)、三輪浩司 (東北大)

講義形式のセミナーは毎年夏にKEKつくばキャンパスで開催している先端エレクトロニクス DAQ セミナーである。この講義は計測技術をこれから学ぼうとする人々を対象にしており予備知識なしで学ぶことができる内容にすることを目標としている。2017年度は7月31日から8月3日の4日間開催された。2016年度までの多くの受講者を受け入れ可能とするために収容人数の多い小林ホールで開催していたが、近年の参加者数が50名程度で安定したため会場を4号館セミナーホールへ変更した。このため参加人数に60名の上限を設け募集を行った。満員まで参加希望者が集まったが3名がキャンセルしたため、実際の参加者数は57名となった。図1にDAQセミナー参加者の学年・職比率を示す。

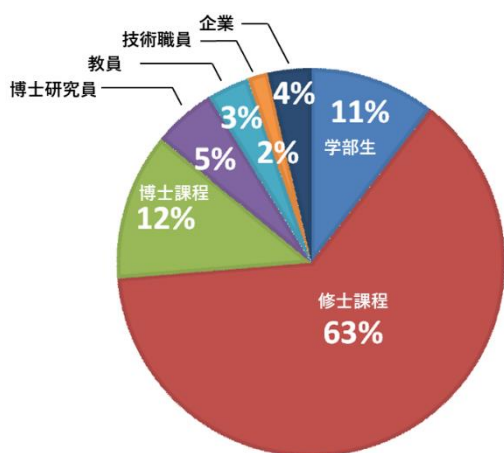


図1 DAQセミナー参加者の学年・職。

図から分かるように参加者の大部分は修士課程学生である。注目していただきたいのは学部生が11%占めていることである。修士論文のテーマとして装置開発を進める学生の多くは修士課程に進学して初めて計測技術を学ぶ。しかし2年間と言う限られた期間で装置開発を行うことは簡単ではないため学部生が基礎知識を身につけることができるように対策を検討していた。その結果、学部生が参加できない要因の一つが旅費支給の問題であることが分かった。そこで、DAQセミナーでは学部生に対しても旅費支援を行うことにした。今回参加した学部生の多くが旅費支援を受けている。今後も学部生に優先的に旅費支援を行うので積極的に活用していただきたい。参加者の所属機関は東京大学の7名を筆頭に25機関であった。多くの各機関からの参加者数は1名から3名の範囲である。参加者の所属機関、受講者のアンケート回答などはDAQセミナーのWebページに掲載されている[14]。

トレーニングコースは技術毎にASIC, FPGA, DAQミドルウェアの3種を開催している。ASICトレーニングコースは名古屋大学と東北大で9月にそれぞれ3日間、FPGAト

レーニングコースは8月に名古屋大学、9月に佐賀大学、10月に核融合科学研究所、2月に東北大学でそれぞれ2日間、DAQミドルウェアはKEKつくばキャンパスで3日間開催された。各セミナー、トレーニングコースの詳細はWebページを参照していただきたい[15]。

2017年度に新たな試みが二つあった。一つ目は留学生を受け入れての集積回路技術教育、二つ目はFPGAトレーニングコースが九州地区連携により開催されたことである。

留学生に対する技術教育はアジアからの留学生2名をKEKで受け入れCMOS65nmプロセスを用いたGHz帯トランスインピーダンスアンプ設計などの集積回路技術教育を行った。

FPGAトレーニングコースは一つの機関で開催していたが、九州地区においては有志が連携して佐賀大学で開催した。2016年度までは九州大学が単独で開催していたが九州大学の東城氏が発起人となり九州地区の有志、佐賀大学の房安氏、宮崎大の武田氏、長崎総合科学大学の大山氏（参加順）が賛同することにより地区連携による開催が実現された。地区連携は以下の利点がある。

- 会場を持ち回り制にすることによる若手の学習機会増加
 - 特に旅費を出しにくい学部生に有効。
- 参加機関間の連携強化
 - 関係者が集まることで情報交換や新たな連携プロジェクトなど新たな試みが始まる可能性が高くなる。
- 開催継続性の向上
 - 会場準備、講師などの負荷分散による負荷低減効果により継続性が増す。

今回の開催では定員20名を超える参加希望者があったが、実習機材数の制限により20名に制限して開催した。今まで九州地区での開催で定員に達したことはなく、これも協力者が増えたことによる告知範囲の拡大などの連携効果の表れと見ている。2018年度は宮崎大で開催予定である。このような地域連携活動は計測技術の伝承や連携による開発の観点からも重要であると考えているため積極的に協力および支援を行う。

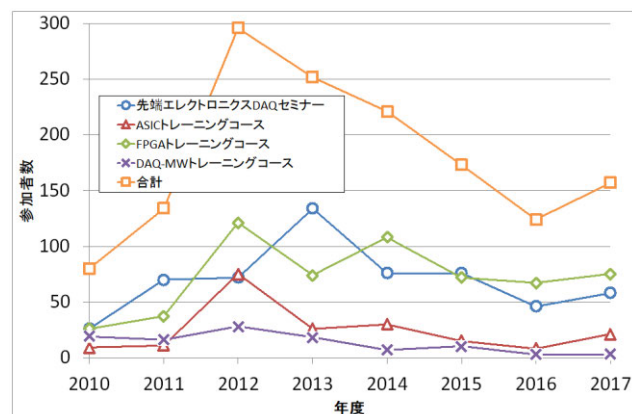


図2 教育プログラム参加者数遷移。

昨年度、教育プログラムの参加者数が減少し続けていることを報告した[8]。その要因が教育プログラムの質の問題なのか、または単に安定数に収束しようとしているのか不明であった。昨年の報告時に挙げた幾つかの問題点に対して対策を行ったが、その効果が現れるのは2018年度以降と考えている。その理由は、いわゆる“ロコミ”である。教育プログラムの参加者に対するアンケート結果を見ると研究室の先輩や友人から勧められて参加する人が少なくない数を占めている。若手に話を聞いた印象ではロコミはアンケート結果の数字より大きな影響を及ぼしているように感じる。2017年度までの教育プログラム参加者数遷移を図2に示すが、ロコミの影響を考慮すると2016年度までの評価の結果と考えるべきである。受講者総数は増加しており減少傾向が止まったようである。プログラム別の受講者数について見ると、ASICトレーニングコースが増加している。これは開催回数を一回から二回に増やした効果である。ほかのプログラムの増加もプログラム内容によるものではなく参加希望者数の年変動によるものと考えられる。参加者数減少が止まったことから、暫くは現状維持を基本方針とする。今後は新しいプログラムの導入などにより内容をさらに充実させることを検討したい。

2.3 共同研究開発

Open-Itでは組織を超えた連携により研究開発を進めている。この共同研究開発の目的は二つある。一つ目は研究開発された設計資産をOpen-Itメンバー間で共有することで研究開発の効率化を進めることである。二つ目は装置開発初心者が経験者から技術的支援を得ることで学びながら開発を進める実践的教育である。これらにより実験推進力をお互いに強化しあうことを目指している。

現在43の開発プロジェクトが進められている。これまで88のプロジェクトが提案され45のプロジェクトが終了した。これらのプロジェクトで開発された装置は実際の実験で使うことが目的であるが、将来の開発に向けてのプロトタイプが目的のプロジェクトもある。いずれも実験を推進するための開発であることを重視している。

教育プログラム参加者数減少と同様に物理学会での講演数が減少していることを昨年度報告した[8]。その要因を終了プロジェクト数増加とOpen-It開発プロジェクトで技術を習得し技術支援が不用になった若手や実験グループの増加によるものと予想した。物理学会でのOpen-It関連発表数の年度遷移を図3に示す。図から減少傾向は続いていることが分かる。減少しているが34の講演が行われていることから技術支援活動の必要性はあると考える。近年の装置開発関連の講演数は決して少なくないことからOpen-Itの技術支援が不用な方の活躍により加速器科学分野における装置開発が活発になっているとみなしてよいのではないだろうか。

これはOpen-It発足時に目指していた状態と言える。今後は数を増やすことを目指すのではなく技術的に高度な研究開発を開発経験者が連携して進めるなど質の向上を目指したい。

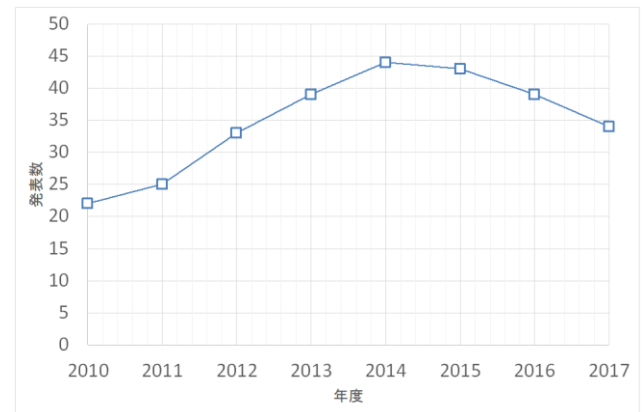


図3 物理学会講演数遷移。

2.4 交流のための場の提供

基礎科学を探究する実験家にとって装置は道具であり研究対象ではないため装置開発において分野内外の協力関係を築きやすい。しかし、協力関係を築くきっかけとなると思われる各種研究会は実験分野毎に開催されることが多い。そのため異なる分野の開発者が交流する機会は少ない。そこで、異分野の装置開発者間の交流を促進する場として装置開発に焦点を合わせた研究会を開催している。2017年度は例年開催している「若手の会研究会」と「計測システム研究会」を開催したが、今回は初めて合同で開催した。

若手の会研究会はOpen-It若手の会[16]が主催する若手を対象にした研究会である。若手の会とは装置開発を進める若手間の連携強化を目的に設立され、Open-It活動の基盤を強化する重要な役目を担っている。若手のみで運営されており研究会などを企画から実施まですべてを経験できる貴重な場となっている。計測システム研究会は計測システムに焦点を合わせた研究会であり開発者の異分野交流を促すための研究会である。

2017年度は東京大学の坂本先生に若手へ向けての特別講演を依頼した。その講演までを計測システム研究会、講演後を若手の会研究会として開催することで双方の参加者が特別講演を聴講できるようにプログラムを作成した。

前半の計測システム研究会は10月に函館で3日間開催された。参加者数は29名、一般講演数は17講演であった。講演内容の実験分野は加速器科学全般に加え工学系や地球物理学などであった。標準的な一つの講演時間が30分、各講演間に最低10分間の休憩を挟んだプログラムとしたが議論が活発になり休憩時間が無くなることも少なくなかった。例年と比較して少人数であったが会場でも異分野間で情報

交換する姿を見ることができたことから目的は果たすことができたと思う。坂本先生の「デジタルエレクトロニクスの50年を振り返る」と題された特別講演はご自身の実験家としての経験と世の中の技術発展をお互いに組み合わせながら過去の出来事を振り返る内容で先生独自の切り口でとらえつつこれから計測器開発をけん引する若手に多くの示唆を与える内容であった。2時間と言う長い講演であったと思えないほど集中して聴講していた聴衆の表情が印象的であった。特別講演の若手の感想は若手の会による報告[17]が既に本誌に掲載されている。参考にしていただきたい。

計測システム研究会は開催頻度を隔年として予定していたが様々な理由により毎年開催していた。予定していた開催地での開催が一巡したため次回は2年後の2019年度に開催する。

2.5 まとめ

減少傾向が続いていた教育プログラム参加者数の減少が止まり、物理学会での講演数は減少が続けていることが分かった。この結果から教育プログラムは現状維持を基本として進める。研究開発は技術支援から技術連携に重点を置くプロジェクトを増やす方向へ活動に移していく。そのためには初学者向けの教育プログラムに加えて開発経験者を対象としたセミナーなどを新たに設けることも必要であろう。積極的に検討したい。

Open-Itの活動は2018年度で9年目であり活動期間が10年になる日も近い。学生時代に教育プログラムを受講し、若手研究者として装置開発を進める方が現れたことは関係者として嬉しい限りである。今後も技術教育活動や連携強化支援事業を進めることで加速器科学とその周辺分野へのさらなる貢献を目指す。

最後に Open-It の活動を理解し支援していただいている多くの方々に感謝したい。特に開発プロジェクトを積極的に進めている若手や教育プログラムの参加者、Open-Itメンバーの皆様に深く感謝したい。

この活動はKEK加速科学総合支援事業の支援を受けている。高エネルギー加速器研究機構の機構長をはじめとするスタッフの皆様に深く感謝したい。ASIC 開発教育活動は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し日本ケイデンス株式会社、シノプシス株式会社の協力を得て行われている。

3 開発プロジェクト紹介: J-PARC muon g-2/EDM 実験のためのシリコンストリップ検出器用読み出しASIC “SliT” の開発 (KEK, 九州大学)

3.1 実験の背景

われわれJ-PARC E34 実験は、ミューオンの異常磁気能率(g-2)と電気双極子能率(EDM)を精密に測定することで標準理論を超える新しい物理の探索を目指している。ブルックヘブン国立研究所(BNL)で行われた実験[18]はg-2の測定値が標準理論の計算値より3標準偏差以上大きいことを報告しており、現在、その後継実験がフェルミ国立加速器研究所(FNAL)で行われようとしている。われわれはBNL, FNALで用いられている手法とは異なるまったく新しい実験手法により、BNLの実験が観測した標準理論からのずれを検証する。実験の詳細については過去の高エネルギーニュースの記事を参照されたい[19]。また、理論グループによる活動も活発化しており、muon g-2の理論値のより正確な評価とさらなる高精度化を目指す研究グループ“Muon g-2 Theory Initiative”が形成されている[20]。

3.2 読み出しASICへの要求・仕様

われわれの実験では運動量300 MeV/cに加速したミューオンビーム(40,000 muon/spill)を25 Hzで入射し、磁場(3 T)中の直径66 cmの円軌道内でミューオンを蓄積する。蓄積軌道の内側にシリコンストリップ検出器を設置することで、ミューオン崩壊から生じる陽電子を捕らえる(図4)。

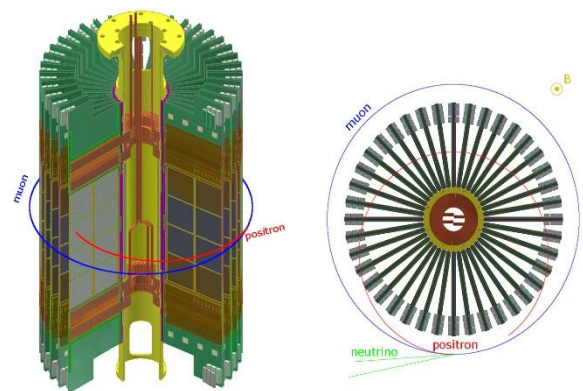


図4 陽電子飛跡検出用シリコンストリップ検出器の外観図。

シリコンストリップ検出器用の読み出しASICには、最大1.4 MHz/stripの高計数率環境下でパイルアップの影響を防ぐために、立ち上がり時間を50 ns以下、信号幅を100 ns以下にすること、高効率な飛跡検出のために、time-walkを5 ns以下に抑えること、そして低ノイズ(S/N>15, ENC<1600 e-)であることが要求される。また、ミューオンのg-2/EDMを精密に測定するためには蓄積したミューオンの寿命($\gamma\tau \sim 6.6 \mu\text{s}$)の5周期分以上の間、陽電子のヒットデータを測定する必要がある。そのため、ASICはコンパレータ出力(ヒットの有無)を5 ns間隔でサンプリングし、40.96 μs の間のヒット情報をメモリに保存し、出力する。

3.3 実機仕様の試作 ASIC “SiT128A” と実機シリコンストリップセンサーによる検出器モジュールの製作

ミュオンの g-2/EDM 精密測定実験用に “SiT” と呼ぶ読み出し ASIC の開発を進めてきた。開発初期段階では ASIC のアナログ回路部のみを試作して、アナログ回路の最適化を行ってきたが、2016 年に、初めてアナログ・デジタル混載の実機仕様 ASIC “SiT128A” を試作した。性能評価試験を行い、要求性能に近い性能を持っていることを確認した。図 5 にテストパルスを用いたノイズ測定(S-curve scan) の評価結果を示す。

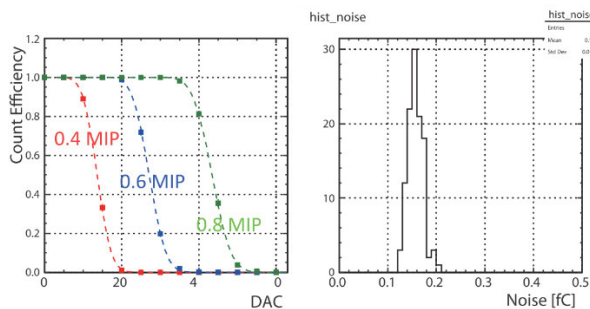


図 5 S-curve によるノイズ測定評価(左) と 128 ch のノイズ分布(右)。
1 MIP の信号は 3.84 fC (Si 厚 320 μm) と想定される。

われわれはすでに実機用のシリコンストリップセンサー (single sided p-on-n, 浜松ホトニクス株式会社製) の製造を始めている。そこで、実機シリコンストリップセンサーと SiT128A を接続した検出器モジュールを製作することにした。4 枚の SiT128A を搭載できる読み出し基板を設計・製作し、1 枚のシリコンストリップセンサーと 2 枚の読み出し基板(8 ASIC) を接続することで、センサーの全ストリップ (1024 本) の信号を読み出す。SiT128A はベアチップのまま、読み出し基板に接着し、ワイヤーボンディングで接続する。シリコンストリップセンサーと読み出し基板の間は株式会社フジクラ社製のピッチアダプタを介して、ワイヤーボンディングで接続する。実際の組み立て作業は九州大学のオートボンダー(Kulicke&sofa 3700plus) を使用して行った。1 台の検出器モジュールの製作には計 3,600 本以上のボンディング箇所があるが、パターン認識機能などを用いて、ボンディング工程を自動化することで、作業時間を大幅に短縮した。実機の検出器モジュールの組み立てに向けては接着・ボンディングなど各工程の歩留まりをさらに改善する必要があるが、1 台の検出器モジュール(1 sensor + 8 ASICs) を製作することができた。製作した検出器モジュールは、J-PARC の MuSEUM 実験(ミュオニウムの超微細構造測定実験)において、実際に使用して、物理データを取得することに成功している。図 6 に製作した検出器モジュールとビームテストの様子を示す。



図 6 組み立てた検出器モジュール(上)と ASIC 周りの拡大図(左下)、
2017 年 6 月の MuSEUM 実験のビームテストの集合写真(右下)。

3.4 実機 ASIC の製作

実機仕様の試作 ASIC “SiT128A” は要求仕様に近い性能で動作し、実際の物理実験で使用できることが分かったが、ミュオンの g-2 と EDM の精密測定のためには time-walk と立ち上がり時間に関して、改善することが望まれる。そのため、従来の回路の CR-RC ベースの波形整形回路の後段に微分回路を配置して、time-walk の改善を図った。立ち上がり時間はノイズとトレードオフの関係にあるが、ノイズの要求値をほぼ満たしつつ、50 ns 以下の立ち上がり時間になるように回路パラメータを最適化した。アナログ回路のみの TEG (Test Element Group) チップ(64 ch)を試作し、現在、性能評価を進めている。

3.5 今後の展望

現在、性能評価中の TEG チップの結果をフィードバックして、実機 ASIC を 2018 年度中に製作する予定である。ASIC の開発と並行して、実機検出器の製作に向けた開発も進めている。実機の検出器では図 4 に示すように検出器層 (ベーン) を放射状に 40 枚並べ、各ベーンには 16 枚のセンサーが載る。検出器モジュールの最小単位としては 4 枚のセンサーが載る “クォーターベーン” である。2019 年度中のクォーターベーンの試作を目指して、構造設計、フレキシブル基板、冷却機構、など実機ベーンに必要な構成要素の開発を精力的に進めている。

3.6 謝辞

J-PARC muon g-2/EDM 実験用シリコンストリップ検出器の読み出し ASIC “SiT” の開発は、読み出し ASIC の設計から、読み出し基板の製作に至るまで、複数の Open-It のプロジェクト[9-11] として、KEK エレクトロニクスシステムグループの方々からの全面的な支援と協力を頂いていることに深

く、感謝したい。本研究は科研費 15H05742 の助成を受けたものである。

4 J-PARC T2K 実験における陽子ビーム位置検出回路の開発 (岡山大学, KEK)

4.1 研究背景

4.1.1 T2K 実験

長基線ニュートリノ振動実験 T2K(Tokai to Kamioka)実験は、茨城県那珂郡東海村にある加速器施設 J-PARC(大強度陽子加速器施設)内で生成した大強度のミューニュートリノビームまたは反ミューニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町の山中にある大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデに打ち込み、ニュートリノの CP 対称性の破れを探索している。ニュートリノビームを生成する陽子ビームの時間構造を図 7 に示す。現在、ニュートリノビームの高繰り返し化・強度の増強を行うことで統計数を増やし、ニュートリノにおける CP 対称性の破れを 99.7% 以上の信頼度で検証することを目指している[21]。

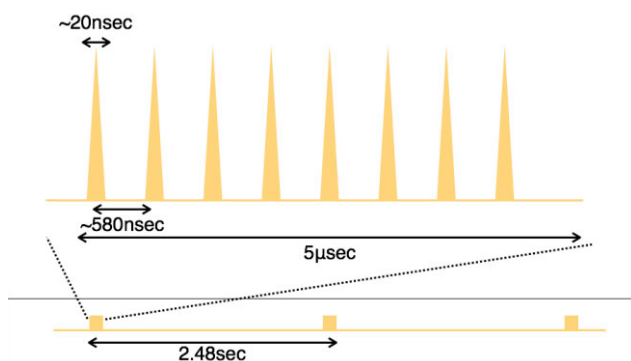


図 7 陽子ビームの時間構造。T2K 実験では、20 ns の“bunch”と呼ばれる陽子ビームの束が 8 つ入った 5 μ s の“spill”と呼ばれる塊を 2.48 s ごとにターゲットに照射している。将来この“spill”の照射間隔を 1.16 s に短縮する計画になっている。

4.1.2 開発目的

ニュートリノビームは、J-PARC 内の MR と呼ばれる加速器で生成される陽子ビームを炭素ターゲットに照射することで作られる。大強度陽子ビームを用いる J-PARC ニュートリノビームラインでは、機器保護のために陽子ビームの軌道や幅を常に監視し、異常時には直ちにビームを停止する必要がある。将来の陽子ビームの高繰り返し化に向けて、陽子ビームモニター SSEM(=Segmented secondary Emission Monitor, 図 8)からの信号を用いて、FPGA でビーム位置などをリアルタイムで計算し、位置がずれていた場合に自動でビームをストップするモジュール PAPILLON(=beam Position And Profile interLock module for Neutrino experiment)の開発を行った[12]。



図 8 SSEM の写真。SSEM は“strip”と呼ばれる厚さ 5 μ s、幅 3.5 mm~5.0 mm の Ti ホイルが 24 本並んだ構造になっている。

4.2 開発モジュール(PAPILLON)の開発

PAPILLON 開発は筆者(彌益)の修士 1 年次から新規に PCB を開発することから始めた。PCB は T2K 実験で現在使用されているアッテネータモジュールを基に開発し、同時に信号処理用にモジュールに搭載した FPGA の firmware 設計を進めた。最終的には修士 2 年次に開発した PAPILLON ボードに修正を加えた ver2 を開発した。PAPILLON board の写真を図 9 に載せる。

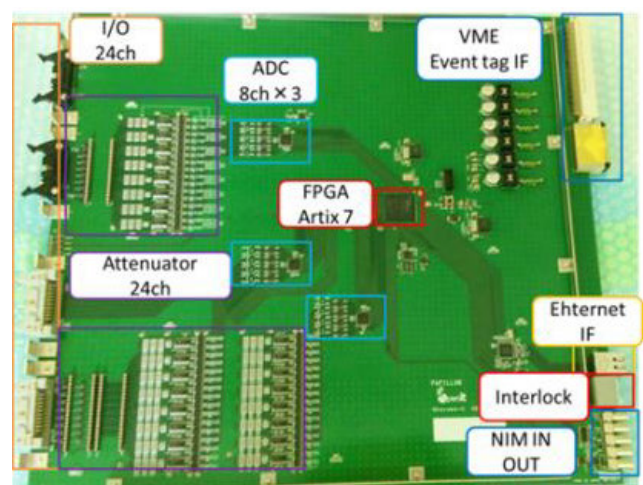


図 9 PAPILLON board ver.1 の写真。PAPILLON board は陽子ビームモニター(SSEM)から送られる 24ch の信号を処理する。

陽子ビームモニターからの信号は、PAPILLON board のアッテネータ部分で減衰され、実装した FADC で信号を AD 変換し、実装した FPGA でビーム位置を計算する。PAPILLON で取得した信号波形とビーム位置計算結果は LAN ケーブルを通して T2K の DAQ システムに送られる。T2K DAQ とのデータの同期に必要な信号は VME から取得する。また、ビーム位置が設定した閾値からずれていた場合にビーム停止信号を発報する。

4.3 陽子ビームを用いた動作試験

PAPILLON は、修士 1 年次に 1 回、修士 2 年次に 3 回の計 4 回、T2K 実験のビームラインにて性能評価を行った。その結果、ADC の sampling rate 80MHz で陽子ビームからの信号波形を取得できることを確認した。ビーム位置を計算する初期の FPGA ファームウェアは、現在のオンライン解析手法によるビーム位置を再現しなかったが、取得した信号波形のペDESTAL を考慮することで、図 10 に示す通り、ビーム位置を変えながらデータ取得を行い、ビーム位置の変化を再現することを確認した。

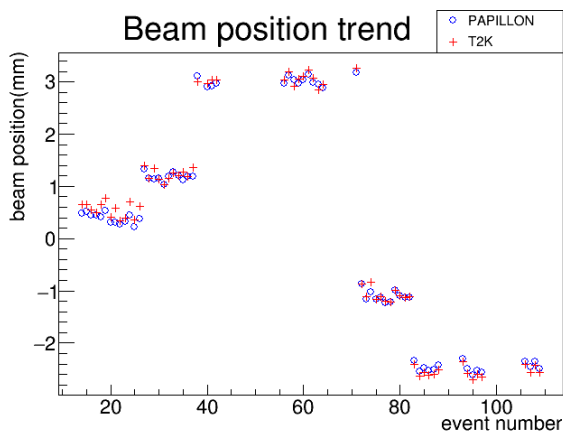


図 10 陽子ビームの位置を変えながらデータ取得した PAPILLON firmware におけるビーム位置計算結果(青色○)と T2K 実験の現在の解析手法によるビーム位置計算結果(赤色+)の比較。

4.4 まとめ

ニュートリノでの CP 対称性の破れの検証のため、T2K 実験ではニュートリノビームの高繰り返し化を計画している。それに向けて、陽子ビームの位置をリアルタイムで検知し、位置がずれていた場合は Interlock 信号を発報できるモジュールおよび firmware の開発を行った。計 3 回の動作試験を通して要求されている機能を満たしていることを確認した。今後は T2K 実験へのインストールへ向けて、firmware の性能評価を行い、ビーム位置計算の感度向上や、ビーム停止信号の動作を検証していく。

5 プロジェクト紹介：新型太陽中性子望遠鏡 SciCRT のための高速読み出し用バックエンドボードの開発（名古屋大学）

5.1 はじめに

太陽は、われわれにもっとも身近な天然の粒子加速器である。太陽系最大のエネルギー解放現象 (10^{29} - 10^{32} erg) である太陽フレアにより、陽子などの宇宙線が数十 GeV 程度まで加速されることが知られている。しかし、太陽フレアによって宇宙線がどのような物理過程で加速されるのか、実はまだよくわかっていない。

太陽フレアで加速された宇宙線が太陽大気と相互作用すると、太陽中性子が生成される。SciBar Cosmic Ray Telescope (SciCRT) は、太陽中性子を観測する目的で 2013 年 4 月にメキシコ・シエラネグラ山 (4,600 m) に設置された。この検出器は、もともと加速器ニュートリノ実験 (K2K 実験) のために開発された検出器 (SciBar) であり、約 15,000 本のプラスチックシンチレータバーから構成される全感知型の飛跡検出器である。

われわれが実験を行う高山は、環境中性子が地上の 30 倍と圧倒的に多く、SciCRT では頻度の高い環境中性子と太陽中性子の両方の信号を取得することになる。しかし、既存のデータ収集システムでは大きな不感時間が生じるため、70% 以上のデータを取りこぼすことになり、SciCRT の太陽中性子に対する感度は大きく制限されてしまう。そこで、われわれは SciCRT のための高速読み出しシステムを開発することにした。

5.2 高速読み出し用バックエンドボードの開発

ここでは、中性子の検出からデータ収集までの流れを説明する。まず、中性子がプラスチックシンチレータバー中の陽子と核相互作用を起こし、陽子を反跳させる。その反跳陽子がシンチレータ中を通過することで発生するシンチレーション光は、波長変換ファイバーを介して、光電子増倍管 (MAPMT) で捉えられる。MAPMT の背面には、フロントエンドボード (FEB) が取り付けられており、アナログ信号の処理が行われる。FEB には IDEAS 社の VA/TA チップが採用されており、VA ではサンプルホールド回路でエネルギー情報を、TA ではディスクリミネータでヒット情報を生成する。バックエンドボード (BEB) では、FEB の VA/TA チップのコントロールを行い、エネルギー情報を ADC 情報に変換し、さらに VME バスで ADC 情報を DAQ PC へ転送する。トリガーボード (TRGB) は、各 BEB からヒット情報を集約し、トリガー条件を満たしたイベントの ADC 情報のみを記録するように BEB にトリガー信号を伝達する。

問題となる不感時間は、BEB から ADC 情報を VME バス経由で転送する際に発生する。BEB 1 枚の ADC 情報取得にかかる時間は、約 1 msec である。中性子信号の ADC 情報を取得する際、典型的には 2-3 枚の BEB を読み出すため、不感時間は 2.5 msec 程度となる。さらに、荷電粒子の veto に使用するアンチ信号にも、読み出しノイズの影響で、同様に不感時間が発生する。

そこで、われわれは従来の BEB で使用されていた VME バスではなく、SiTCP を実装することで Ethernet 転送可能な新 BEB (NBEB) を開発することにした。1 枚の NBEB は従来の半分の FEB 4 枚を担当し、分散処理させることで、SiTCP (100 Mbps) で転送速度の要求が満たされることがわかった。また、100 Mbps SiTCP は動作も安定しており、1

Gbps SiTCP に比べ、発熱も抑えられるため、高山での長期無人運転に都合がよい。図 11 は、われわれが開発した NBEB である。中央の FPGA では、4 枚の FEB の VA/TA チップのコントロール、SiTCP による PC へのデータ転送および PC からのスローコントロール（おもに VA/TA チップをコントロールするパラメータの書き換え）、TRGB との信号のやりとりなどを行う。基板上には、高山での回路の発熱を考慮し、温度計を実装した。さらに、リモートで FPGA 内部回路の書き換えが可能な仕様になっている。また、Ethernet により NBEB はそれぞれ独立にデータを取得するため、イベント同期のためにカウンターを実装し、イベントごとにその値を記録している。カウンターには全 NBEB 共通に 1PPS の信号を分配することで、共通リセットがかかるようになっている。

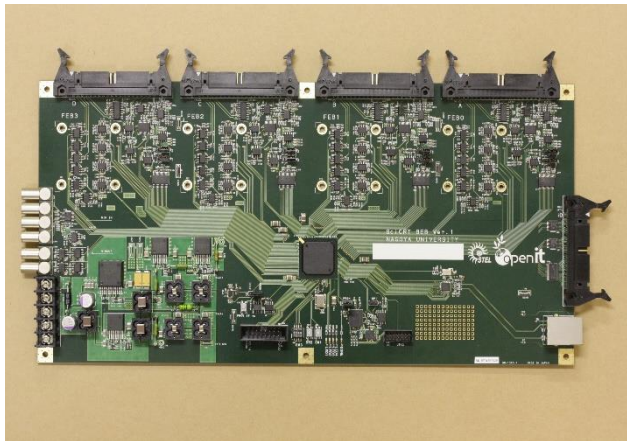


図 11 高速読み出し用新バックエンドボード[22]。

2014 年末までに、名古屋での NBEB の基礎性能評価やメキシコ・シエラネグラ山でのテスト観測を終え、その後 NBEB の量産とアセンブルを行った。そして、2015 年 6 月に SciCRT の実機の一部 (1/8) とアンチカウンターに NBEB がインストールされ、高速読み出しシステムを実装した SciCRT は連続的なオペレーションを開始した。現在まで無事にデータ収集を継続している。図 12 は、SciCRT にインストールされた NBEB を含む新 DAQ システムの外観である。データ転送速度に関しては、当初想定していた通り、従来の BEB の約 10 倍のデータ転送速度を達成できている。

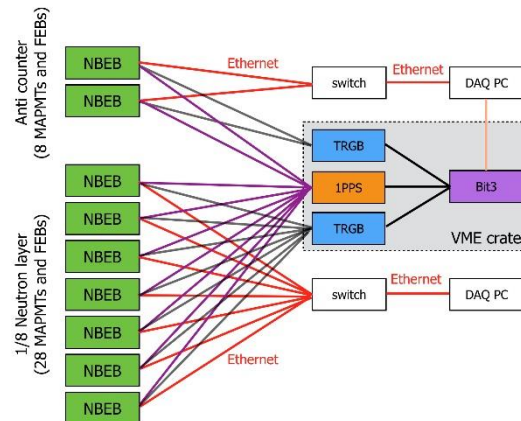


図 12 NBEB を用いた新 DAQ システムの全体像[22]。

参考文献

- [1] Open-It Web サイト, <http://openit.kek.jp/>
- [2] 田中真伸, 高エネルギーニュース 29-3, 151 (2010).
- [3] 田中真伸, 日本物理学会誌 66-4, 290 (2011).
- [4] 内田智久, 浦義博, 本多良太郎, 山口貴弘, 高エネルギーニュース 30-3, 222 (2011).
- [5] 内田智久, 他 Open-It 世話人会, 高エネルギーニュース 32-3, 165 (2013).
- [6] 内田智久, 坂下健, 榎本良治, 他 Open-It 世話人会, 高エネルギーニュース 33-4, 279 (2014).
- [7] 内田智久, 佐野祐太, 織井安里, 石塚光, 高エネルギーニュース 35-1, 10 (2016).
- [8] 内田智久, 岸下徹一, 小嶋健児, 鈴木一仁, 高エネルギーニュース 36-1, 25 (2017).
- [9] SLiT128A 開発プロジェクト Web ページ, <http://openit.kek.jp/project/SLiT128A>
- [10] SLiT128B 開発プロジェクト Web ページ, <http://openit.kek.jp/project/SLiT128B>
- [11] SLiT128A 評価ボード開発プロジェクト Web ページ, http://openit.kek.jp/project/SLiT128A_eval/SLiT128A_eval
- [12] Beam position and profile interlock module 開発プロジェクト Web ページ, http://openit.kek.jp/project/beam_monitor_interlock/beam_monitor_interlock
- [13] メキシコ高山における宇宙線高精度観測のための高速読み出しシステムの開発 Web ページ, http://openit.kek.jp/project/sciart_beb/public/sciart_beb
- [14] 先端エレクトロニクス DAQ セミナー2017 Web ページ, <http://openit.kek.jp/training/2017/daq/home>
- [15] Open-It 教育の Web ページ, <http://openit.kek.jp/training>

- [16] Open-It 若手の会 Web ページ,
<http://openit.kek.jp/training/wakatetop>
- [17] 中澤美季, 安田浩昌, 高エネルギーニュース 36-4, 197 (2018).
- [18] G.W. Bennett et al., Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [19] 三部勉, 石田勝彦, 佐々木憲一, 高エネルギーニュース 31-3, 209 (2012).
- [20] 野村大輔, 高エネルギーニュース 36-4, 204 (2018).
- [21] 市川温子, 岩本康之介, 坂下健, 高エネルギーニュース 35-3, 129 (2009).
- [22] Y. Sasai et al., Nuc. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 857, pp. 50-57 (2017)