

## 2014 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

坂下 健  
kensh@post.kek.jp

東京大学宇宙線研究所

榎本 良治  
enomoto@icrr.u-tokyo.ac.jp

### 他 Open-It 世話人会

2015 年 2 月 3 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す[1-5]。組織を超えた連携により計測技術の教育と開発を進めることで加速器科学とその周辺領域に貢献することを目的としています。

本文章では 2014 年度の Open-It 活動報告をします。2 節で活動全体の報告を行い（担当 内田，Open-It 世話人会），3 節と 4 節で連携開発プロジェクトを二つ紹介します。一つ目は液体アルゴン検出器に関する紹介（担当 坂下），二つ目はコンプトンカメラに関する紹介です（担当 榎本）。

## 2 2014 年度 Open-It 活動報告

### 2.1 技術教育

以下のような技術教育活動を行っています。

- 1 先端エレクトロニクス DAQ セミナー：基礎技術習得のための講義
- 2 ASIC トレーニングコース：Application Specific Integrated Circuit (ASIC) 技術を習得するための実習
- 3 FPGA トレーニングコース：Field Programmable Gate Array (FPGA) 技術を習得するための実習
- 4 DAQ-MW トレーニングコース：DAQ-Middleware (DAQ-MW)[6,7] 技術を習得するための実習
- 5 開発プロジェクト：実験に使用する装置の開発を専門家の技術支援を受けながら進める実践的教育

開発プロジェクトについては次節で報告しますので、本節では先端エレクトロニクス DAQ セミナーと各トレーニングコースについて報告します。

教育プログラム 1 から 4 の延べ受講者計は 983 名となりました。図 1 は Open-It 教育プログラム受講者数の年遷移です。本年度は先端エレクトロニクス DAQ セミナー参加

者数が前年比で 58 名減少したことの影響により全体で 31 名減少し 221 名となりました。

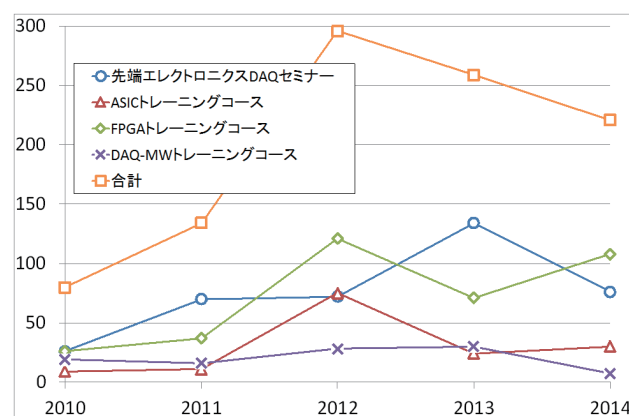


図 1 教育プログラム受講者数遷移。

先端エレクトロニクス DAQ セミナーを本年度から総研大と合同開催としたことを機会に講義内容を以前よりも広い範囲に変更しました。このことが参加者数を減少させたようです。2013 年度まではエレクトロニクス技術中心の講義だったので何を学ぶことができるか明確でしたが、講義内容を広範囲にするために本年度採用したオムニバス形式の講義では不明確だったようです。本セミナーは予備知識がない学生を主な対象としていますが、学生の視点からオムニバス形式の講義内容を見た場合、講義内容の焦点がぼやけ魅力を感じなかったのではと推察しています。学生数が減ったことは反省すべき点ですので来年度はエレクトロニクス技術を中心とした講義内容へ変更し講義内容を明確化します。

各トレーニングコース参加者数は安定したと感じます。ASIC については年間 20 名程度、FPGA については 100 名程度、DAQ-MW については 10 名程度です。ある会場では申し込み開始から 3 日間で募集人数に達する場合もありま

した。この受講者数は本プログラムの必要性を示していますので今後も技術の進歩に合わせた内容に修正しながら継続する予定です。

工学系や生物系分野からの参加者数が増加したことが印象的でした。これは加速器科学分野で培った計測技術が想定範囲を超えた分野に対しても貢献できることを示唆しているのではないのでしょうか。今後は異分野間連携や交流へ発展することを期待します。

## 2.2 開発

研究者が連携して先端技術開発を進める通常の意味での開発と若手の技術教育を目的とする開発の2種類の活動を進めています。現在は主に後者の教育としての開発が行われていますが、連携による先端技術開発も始まっています。ここでは、教育目的の開発について報告します。

教育目的の開発ではOJT(On the job training)と呼ばれる方法を用いて教育と開発を同時に進めています。教育対象となる修士課程学生などの若手が専門家から技術的支援を受けながら実際に実験で使用する装置を開発します。開発過程で遭遇する問題を専門家と共に解決し装置を完成させることで実践的技術を習得します。今まで64の開発プロジェクトが進められ、そのうち34のプロジェクトが終了しました。毎年5つ程度の新規プロジェクトが提案され活動をはじめ、ほぼ同数のプロジェクトが終了しています。各プロジェクトの開発過程で創られた設計資産は一部の例外を除いてOpen-Itメンバー間で共有され自由に活用できます。この共有化が教育を効果的に進めることに大きく貢献しています。

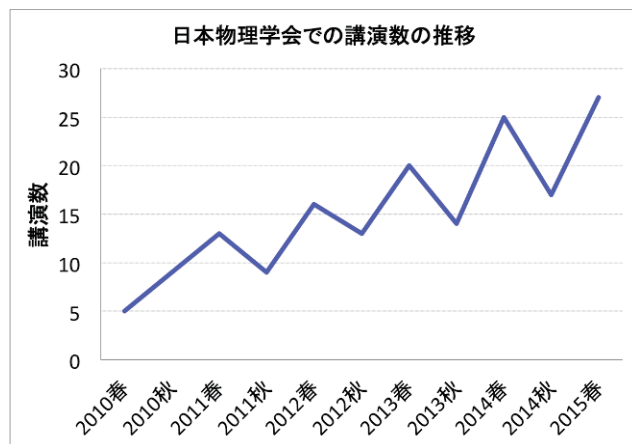


図2 物理学会での発表件数。

図2に物理学会での発表数遷移を示します。天文学会などほかの学会でもOpen-It関連の発表が行われていますが本グラフには含まれていません。秋と春に分けて発表数遷移を見ると増加傾向であることが分かります。これは、Open-Itプロジェクトで開発した装置開発の成果が年々上昇していると解釈できます。確実に本活動が加速器科学とそ

の周辺領域に貢献していることが分かります。

## 2.3 交流

観測対象が異なる計測装置の一部が同じであることは珍しくありません。たとえば、検出器が異なってもデジタル処理が非常に似ている場合などです。そのような類似の装置を開発している開発者の交流の場として装置開発に焦点を合わせた「若手の会研究会」と「計測システム研究会」を毎年開催しています。

若手の会研究会[8-10]はOpen-It若手の会が主催する若手を対象にした研究会です。若手の会とは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ます。若手のみで運営されていますので若手同士が気楽に情報交換や議論を行いやすい雰囲気を作られています。このことで実際に開発を担当する若手の技術力向上が促進されています。

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す。本年度はKEK東海キャンパスで75名の参加者を迎えて開催されました[11]。異分野間の開発情報を知ることができる数少ない研究会となっており毎回約50名程度の参加者数となっています。学生、研究者、技術系職員に加え企業の技術者と幅広い人々が参加しています。来年度は大阪大学核物理研究センター(RCNP)の支援を受けて夏にRCNPで開催する予定です。

## 2.4 まとめ

Open-Itが開催するセミナー、トレーニング、研究会などを各地で定期的に開催することで、当初KEKに集中していた技術が各機関のOpen-Itメンバーに継承され発展しています。その効果の代表として、東北大学では教育プログラムの講師を自ら務めて独自開催しておりこのような活動は今後広がると思われます。また、名古屋大学とKEK間ではASIC技術に関する技術職員交流などが始まっています。ASIC技術を習得するためには時間がかかりますので組織を超えた職員間で基本技術を共有し継承することは重要です。このような交流も支援していきます。

教育活動や装置開発などは短時間で成果を出すことが難しい活動です。Open-Itの活動はゆっくりですが確実に成果が現れていると考えます。今後も組織を超えた連携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活動を進めます。来年度は設計資産の共有化を強化するために多機関間での共同プロジェクトを立ち上げ設計資産をデータベース化することで利便性を向上させる予定です。興味がある方は是非参加してください。Open-Itに関する活動についてコメントやご意見などありましたら是非お聞かせください。Open-It Webページのコメント投稿機能やメールなどで内田まで連絡していただくと幸いです。

最後に Open-It の活動を理解して支援していただいている方々に感謝します。特に開発プロジェクトで積極的に進めている若手の方々、教育プログラムに参加した若手の方々、Open-It メンバーや各分野の皆様へ深く感謝いたします。この活動は加速科学総合支援事業の補助を受けています。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へ深く感謝いたします。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ます。

## Open-It 世話人会

Open-It 世話人会は活動に賛同している有志の方々により構成されています。活動内容や方向性などについての議論を行っています。構成員は以下の方々です（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（阪大）、早戸良成（東大）、房安貴弘（佐賀大）、宮原正也（東工大）、三輪浩司（東北大）

## 3 プロジェクト紹介：LArTPC (KEK, 横国大, 岩手大, 呉工業高専)

### 3.1 はじめに

LArTPC 測定器は、高い粒子識別能力とエネルギー損失測定能力を持ち、この性能の高さから次世代ニュートリノ振動実験の後置検出器として考えられています。現在、20 キロトン以上の大型化実現にむけた開発研究が世界各地で行われています。

KEK では国内大学との共同研究で LArTPC 測定器の大型化にむけた基礎技術の開発研究を行っています。この開発項目の1つが、本章で紹介する微小信号を高ゲイン低ノイズで読み出すためのエレクトロニクス開発です。また、将来の大型化にむけて低コスト化も目指しています。

LArTPC の信号を読み出す方法は、液体アルゴン中に読み出し面を設置して電離電子を読み出す「1 相読み出し」と、読み出し面を液面上部のアルゴンガス中に設置してガス増幅を利用する「2 相読み出し」方法があります。現在、われわれのグループでは1相読み出し方法を用いた LArTPC 測定器の開発を進めています。最小電離損失粒子が作る信号の大きさは 4mm ピッチの読み出しでチャンネル辺り数 fC と小さく、このような微小信号を読み出すためにはノイズを極力小さく抑える必要があります。今回の開発までは、LArTPC 測定器と読み出しエレクトロニクス(プリアンプ+ADC)を数メートルの信号ケーブルで接続していました。これは、既存の読み出しエレクトロニクスが 19 インチ幅のクレートにハウジングするタイプだったためです。ノイズ

を抑えるためには、プリアンプまでのケーブルを短くして静電容量を減らす必要があります。そこで、エレクトロニクスを測定器にできるだけ近づけて設置できるようにコンパクトなエレクトロニクスの開発を目指しました。最終的には、極低温下で動作するエレキを開発して TPC 読み出し面近くに設置することを目指しています。

開発は、Open-It のプロジェクト[1]として、大学院生が中心となり、また KEK エレクトロニクスシステムグループの専門家の方々からアドバイスを頂きながら進めました。

### 3.2 読み出しエレクトロニクスの開発

まず、低温環境下での動作を目指した、低ノイズ高ゲインで多チャンネルストリップ読み出しのためのプリアンプを実装した ASIC の開発を行いました。この ASIC は、測定器容量 100pF 以下を想定して、最小信号 4fC に対して信号-ノイズ比 10 以上を満たすように設計を行いました。ASIC 製作後は、1 チップだけ載せたテストボードで ASIC の性能を評価します。今回は常温での性能評価を行い、入力電荷に対する出力波高の関係、プリアンプゲイン、ダイナミックレンジ、イントリンジックノイズの測定器容量依存性などが設計値とほぼ一致していることを確認しました。

次に実際の LArTPC 測定器からの信号を読み出すために 32ch の読み出しボードを開発しました。このとき、将来 ASIC を低温環境化に設置することも見込み、測定器からの信号を ASIC で処理する“アナログボード”と ASIC からの出力をデジタル化してデータを収集するための“デジタルボード”を分けて開発しました。アナログボードについても ASIC 性能評価と同様の評価を行い、イントリンジックノイズに関しては 100pF の測定器容量に対して約 1100 電子数という低ノイズ性能を確認しました。また、デジタルボードでは、アナログボードからの信号を 2.5Msps の 12bit ADC で変換してデータを FPGA(Artix7)で収集します。データは SiTCP 技術[12]を用いてネットワーク読み出しされません。

読み出しソフトウェアは、DAQ-Middleware[6]を用いて構築しました。

### 3.3 宇宙線試験

図3は、構築した読み出しエレクトロニクスの写真です。また図4はこのエレクトロニクスをR&D用の小型LArTPC測定器に取り付けた写真です。ボードは全体で約 9cm × 30cm とコンパクトにでき、測定器容器に直接取り付けることができている。この測定器は5.5cmのドリフト長、6.4cm四方の読み出し面をもつ測定器で、この測定器と今回開発したエレクトロニクスを用いて宇宙線試験を行いました。まず、測定器に繋いだ状態でノイズ評価をしました。ノイズは波形読み出しのベースラインのふらつきで評価して、

等価電子数で約 1200 電子数とほぼ予想と一致し、実際の環境でも低ノイズ性能が確認できました。

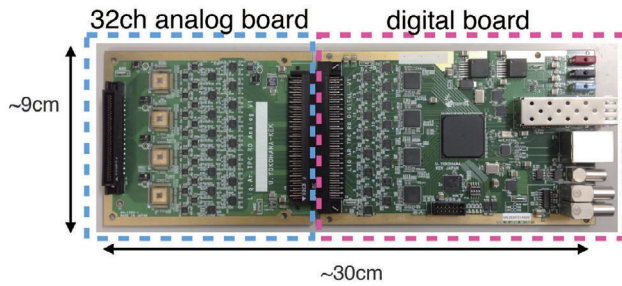


図 3 開発した新しい読み出しシステムの写真。

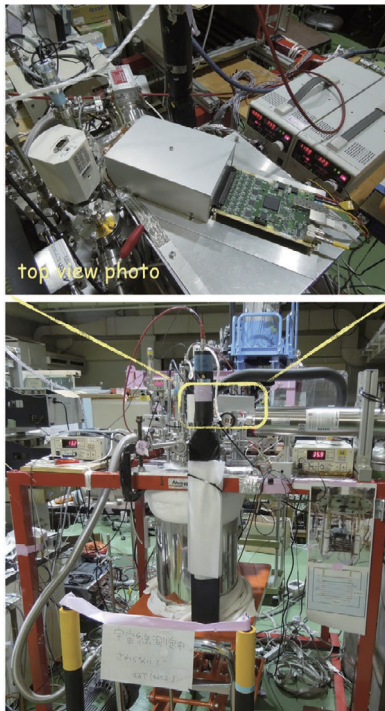


図 4 小型 LArTPC 測定器に取り付けた新しい読み出しシステムの写真。

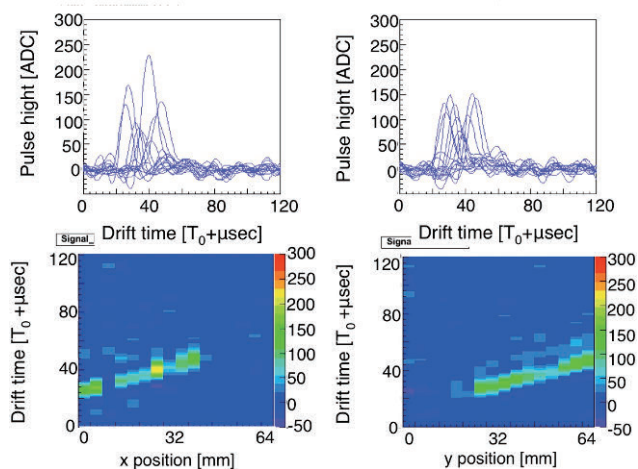


図 5 新しい読み出しエレクトロニクスで測定した宇宙線トラックのイベントディスプレイ。

図 5 は得られた宇宙線のトラックです。約 2 日間の宇宙線収集を行い解析した結果、LArTPC 測定器からの読み出し信号サイズも最小電離損失粒子が作る信号の大きさ(約 13000 電子数)と一致しました。ある特定 1ch を評価した結果、実際の LArTPC 測定器からの信号に対しても信号-ノイズ比 10 以上を確認しました[13]。

### 3.4 次のステップ

大型測定器では測定器容量が 100pF 以上になる可能性があります。今後は大型測定器での使用にむけた読み出しエレクトロニクスの最適化や、ASIC 低温環境下での動作の確立など残っている課題について開発を続けていく予定です。

## 4 プロジェクト紹介: ガンマアイ検出器( $\gamma$ I) の開発 (東大, 茨大, 北里大)

### 4.1 研究背景

2011 年 3 月の東日本大震災に伴い福島第一原発の事故がおこり広い地域が放射能汚染された。数  $\mu$  Sv/h を超える地域、あるいは半径 20km 以内は避難区域となった。しかしながらそれを下回る地域はすべて居住区域のままである。これらの地域の除染活動を効率化し、住民の被ばくをできるだけ低減すべく、低放射能 (0.23-3  $\mu$  Sv/h) においても稼働する高感度ガンマ線カメラ (角度分解能は 3.5 度) を開発した。さらに普及のため低価格化をめざした。

### 4.2 検出器の原理

ガンマアイはコンプトン散乱を利用したコンプトンカメラである[14]。検出器は 2 層になっており、1 層目にてコンプトン散乱、2 層目にて光電吸収したガンマ線イベントを逆投影法と呼ばれる手法によりイメージ化している (CT スキャンと同じ原理) [15,16]。散乱体として CsI(Tl)シンチレータを使用しているため、検出効率がほかと比べて格段に高い。角度分解能を上げるための工夫もなされている。ピンホールカメラと異なり、シールド、マスクが不必要なため大面積にも関わらず軽量で高感度のガンマ線イメージャーが実現できる。

### 4.3 Si-TCP の活用

検出部分は 3.5cm 角の CsI(Tl)結晶であり、光電子増倍管による読み出しを行っている。1 層目、2 層目にそれぞれ 8 カウンターを配置し全部で 16 チャンネルの測定器である。開発当初は NIM, CAMAC による読み出しを行っていたが、測定器が将来的に野外で使用されるため、KEK グループに小型化の相談をしていたところ 16ch の FADC ボードである Si-TCP ボードを紹介されて今に至っている。

#### 4.4 測定の実例

図6は福島市のある住宅における測定例である。左は除染前で右が除染後のガンマ線イメージである。土の露出した部分が  $0.5 \mu\text{Sv/h}$  程度であったが、除染後は  $0.3 \mu\text{Sv/h}$  程度に下がっている。ただし除染率は30%程度であり目標の60%には至っていない。右図中の明るい部分さえ取り除けばよい。ガンマアイにより除染不備が速やかにわかり、今後のフォローアップ除染に役立つことを期待している。

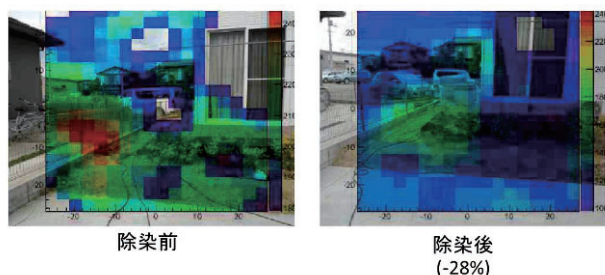


図6 福島市とある住宅庭の除染前(左)と除染後(右)のガンマ線イメージ。

#### 4.5 製品化

ガンマアイは(株)シンセー(受注タイプ)と富士電機(株)(量産タイプ)により製品化されている。図7にその写真がある。右から二番目と三番目の機器が富士電機とシンセーの製品である。

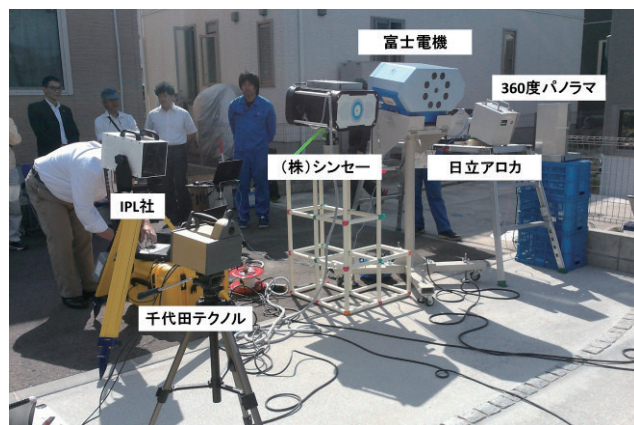


図7 福島市におけるコンペの様子。

図7は先日福島市主催で行われたガンマ線カメラのコンペの様子であり各社が参加した。ガンマアイは感度、価格においてほかに抜きんできた性能を示している。今後の福島市の動向に期待したい。

#### 4.6 近況

図7の一番右側の機器は360度パノラマモニターという新たに開発したガンマアイのプロトタイプである。従来は(±25度, ±25度)程度の視野であったのに対しこれは(±180度, ±36度)の視野を持っている。角度分解能を12度まで落とすことにより(感度を下げることなく)結晶数を

減らすことを可能にし、より安価になっている。今後このモデルの製品化を目指す。

来年度のR&Dとしては現在の3.5度の角度分解能を1.5度まで改善したモデルを製作する予定である(宇宙物理観測, 医療機器を目指す)。

#### 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] DAQ-MW Web サイト, <http://daqmw.kek.jp/>
- [7] 長坂康史, 千代浩司, 技術総合誌「OHM」Headline Review, pp.6-7, 2011年9月号.
- [8] Open-It 若手の会 Web サイト, <http://openit.kek.jp/training/wakatetop>
- [9] 石島直樹, 石徹白晃治, 庄子正剛, 高エネルギーニュース **32-3**, 211 (2013).
- [10] 大石航, 織井安里, 高エネルギーニュース **33-3**, 211 (2014).
- [11] 内田智久, 他 計測システム研究会世話人, 高エネルギーニュース **33-3**, 233 (2014).
- [12] T.Uchida, "Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet", IEEE Transaction on Nuclear Science NS-55 (2008) 1631.
- [13] 修士ポータルフォーラム「液体アルゴン TPC のための信号読み出し回路開発」, 岩崎裕也, 横浜国立大学大学院工学府中村研究室 (2014).
- [14] T.Kamae, R.Enomoto, & N.Hanada, NIM-A, 260, 254-257, 1987..
- [15] 村石浩, 他, 医学物理 34, Sup.1, 165, 2014.
- [16] 村石浩, 他, 日本保険科学学会誌, Vol.17, No.3, 159-164, 2014.