

2015 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

東京大学大学院

織井 安里

orii@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

名古屋大学大学院理学研究科

佐野 祐太

yuta@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

株式会社とめ研究所

石塚 光

ishitsuka@tome.jp

他 Open-It 世話人会

2016 年 4 月 28 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[1-6]。組織を超えた連携により計測技術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にしています。

本文章では 2 節で 2015 年度の Open-It の活動内容を報告します (担当 内田, Open-It 世話人会¹)。その後, 連携開発プロジェクトを三つ, 3 節では高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた μ 粒子検出器用 FPGA TDC 回路の開発 (担当: 佐野祐太), 4 節でスーパーカミオカンデにおける近傍超新星観測用 DAQ の開発 (担当: 織井安里), 5 節で超伝導検出器 MKID 用アナログ・ボード (担当: 石塚光) の開発を紹介しします。

2 2015 年度 Open-It 活動報告 (担当: 内田)

2.1 Open-It

実験を遂行するために不可欠な計測技術の普及と研究開発を連携により推進す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に活動しています。

目的を実現するために 3 つの事業: (1) 技術を普及させるための技術教育活動, (2) 実験で用いる装置を共同で開発する研究開発プロジェクトの推進, (3) 分野を超えて開発者が交流するための研究会の開催, を進めています。これらの活動は独立ではなく一貫したプログラムとなっています。

¹ Open-It 世話人会は活動に賛同する有志の方々により構成され活動内容や方向性などについて諸事の決定を行っています。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 (KEK/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)。

初学者が技術を習得するために参加する技術セミナーやトレーニングコース, 習得した技術を用いて実際の実験で用いる装置を開発する共同研究開発プロジェクト, 開発中の装置や開発した装置について議論する研究会など, 初学者から経験者まで活動できるプログラムを提供しています。以下で 2015 年度のそれぞれの活動について報告します。

2.2 技術教育

2 種類の技術教育プログラムを提供しています。初学者向けの講義形式の技術セミナーと開発を行う際に必要になる専門技術を習得するための実習形式のトレーニングコースです。

1. 先端エレクトロニクス DAQ セミナー
初学者が基礎技術を習得するための講義形式の技術セミナー。9 月に KEK つくばキャンパスで 5 日間開催されました[7]。
2. ASIC トレーニングコース
Application Specific Integrated Circuit (ASIC) の回路開発を行う際に必要になる開発ツールの使い方などを習得する実習形式のトレーニングコース。9 月に名古屋大学, 2 月に KEK つくばキャンパスでそれぞれ 3 日間開催されました[7]。
3. FPGA トレーニングコース
Field Programmable Gate Array (FPGA) を使う際に必要になる開発ツールの使い方などを習得する実習形式のトレーニングコース。8 月に名古屋大学, 11 月に大阪大学 RCNP, 12 月に九州大学, 2 月に東北大学でそれぞれ 2 日間開催されました[7]。
4. DAQ-MW トレーニングコース
DAQ-Middleware (DAQ-MW) 技術[8,9]を用いて DAQ ソフトウェアを開発するために必要な知識を習得する

実習形式のトレーニングコース。9月にKEKつくばキャンパスで3日間開催されました[7]。

上記の教育プログラムの延べ参加者数は2015年度までの6年間で1,156名となりました。年平均で約200名です。図2-1はOpen-It教育プログラム受講者数の開催年推移です。

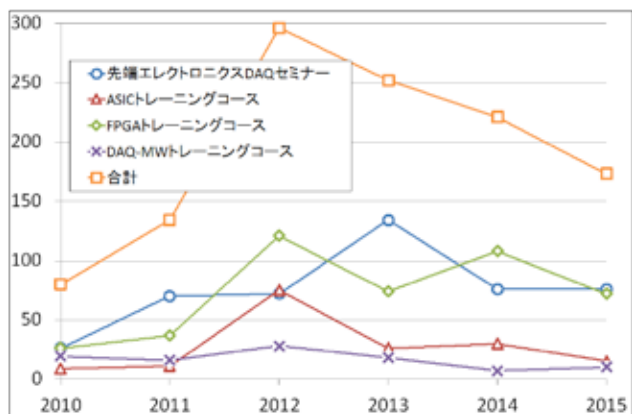


図2-1 教育プログラム受講者数年推移。

年毎の受講者合計数は2012年で最高になり、その後は減少しています。開始後数年は様々な学生や研究者が一斉に受講したことで受講者数が増加し最高値に達しました。その後、徐々に修士課程学生が全参加者数に対する比率が大きくなり減少しています。関連分野の修士課程学生数は決まっているので最終的にある値で安定すると予想します。



図2-2 先端エレクトロニクスDAQセミナー集合写真。

先端エレクトロニクスDAQセミナーは2014年度に参加者数が減少しました。オムニバス形式の講義を採用し広範囲にわたる内容でしたが、このことが受講者に講義内容を分かりにくくし講義の焦点がぼやけたと推察しました。そこで2015年度の講義内容をエレクトロニクス技術中心に戻しました。その結果、受講者数は2014年度と同数の76名になりました(図2-2)。アンケート結果によると受講者に好評だったことが分かります。今後もこの方針で進め受講者の希望を反映させた内容で開催します。

各トレーニングコースの受講者数は年々変動していますが、受講者数が多い年は開催回数も増えていますので開催

回数が異なっていることが大きな理由です。たとえばFPGAトレーニングコースでは定員に達して締め切ることが多いので受講者数は開催回数に依存してしまいます。この変動している受講者数ですが、ASICについては20名/年、FPGAについては100名弱/年、DAQ-MWについては10名/年程度付近を中心に変動しているように見えます。全体としての受講者数は減少していますが、約200名の若手が参加していることは技術プログラムの必要性を示しています。今後も技術の進歩に合わせて内容を更新しながら継続します。

2.3 共同研究開発

Open-Itでは組織を超えて共同で装置の研究開発を進めています。この共同研究開発には二つの目的があります。一つ目は研究開発の効率化です。共同で研究開発された設計資産はOpen-Itメンバー間で共有されています。装置を開発する場合、他者が開発した回路の一部を再利用できることが珍しくありません。そのまま利用できなくても設計時の参考になるため、開発を始めた若手にとって重要な資料になっています。二つ目は若手の技術教育です。装置開発の未経験者または初心者が経験者の技術的支援を得ながら開発を自力で進める実践的な技術教育の場になっています。

今まで82のプロジェクトが進められ、そのうち35のプロジェクトが終了しました。これらのプロジェクトで開発している装置の大部分は実際の実験に使用することが目的です。実際に開発した装置についての結果報告を学会で発表することが多いので、Open-Itで進められている装置開発活動の度合いを知る一つの指標として物理学会でのOpen-It関連発表数が使えます(図2-3)。

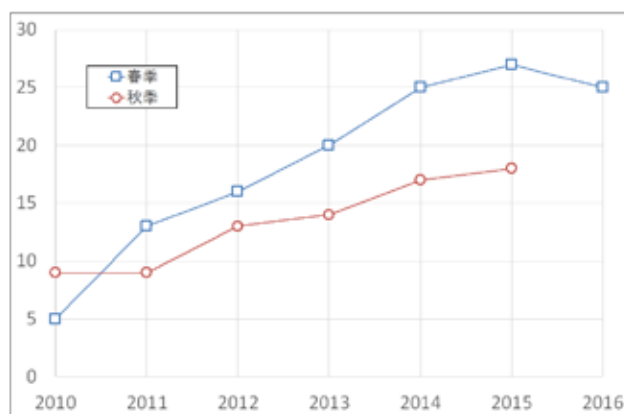


図2-3 物理学会での発表数の年推移。

Open-It関連発表は物理学会以外でも行われていますが、このグラフには含まれていません。発表数は本年度春の大会で若干減少したものの、活動が始まって以来増加傾向が続いています。秋の発表数が春の発表数に対して少ない理由

は修士課程の学生が中心に開発を進めることが多いため修士論文をまとめた後の春の大会での発表が多くなるからです。このグラフから Open-It の活動が確実に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。

2.4 交流

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ありません。このことから装置開発で利害関係が発生しにくいので協力関係を築きやすいといえます。実験対象が異なっても装置の一部が技術的に同じ、または似ていることは珍しくありません。例えば、実験データを最終的には汎用 PC へ転送する現代、検出器が異なってもデジタル処理部が酷似していることは驚くことではありません。このように、高い連携可能性と技術的な類似点が多いにもかかわらず、通常の研究会などの交流の場は研究対象の科学分野で分けられて開催されるため分野が異なる開発者間が交流する機会がありません。そこで、その様な異分野の装置開発者間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。

若手の会研究会は Open-It 若手の会[10]が主催する若手を対象にした研究会[11-13]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おり参加するだけでなく開催場所や内容など自由な発想で企画から実施まで経験できる貴重な場となっています。若手同士が気楽に情報交換や議論を行いやすい雰囲気が作られているので結果として実際に開発を担当している若手の技術力向上が促進されています。



図 2-4 計測システム研究会@RCNP 開催時の風景。

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。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。本年度は大阪大学核物理研究センター(RCNP)の支援を受け、7月に RCNP で 39 名の参加者を迎えて開催されました(図 2-4) [14]。2016 年度は KEK 東海キャンパスで加速器科学実験に焦点を合わせて開催する予定です。

2.5 まとめ

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 の活動の成果はゆっくりですが確実に現れています。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。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、教育プログラム参加者の方々、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。

3 プロジェクト紹介：高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた μ 粒子検出器用 FPGA TDC の開発 (名古屋大学)

3.1 はじめに

2026 年開始予定の高輝度 LHC では、LHC の約 5 倍の陽子陽子衝突頻度($5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を実現し、ヒッグス粒子の精密測定および新物理探索に挑む。陽子陽子衝突頻度の増加により、興味のある事象だけでなく興味のない事象の生成頻度も大きくなるため、事象を瞬時に選別するトリガー系がより重要な役割を担う。

本研究は、高運動量の μ 粒子を含む事象を選別する μ 粒子トリガーの改良を目的とする。これまで μ 粒子の精密運動量測定のために用いられてきた MDT (Monitored Drift Tube) 検出器を新たにトリガー系に導入し、 $200 \mu \text{ m}$ の精度で μ 粒子の飛跡位置を測定するトリガー回路を構築する [15]。MDT 検出器を導入することで、横運動量測定分解能が向上し、トリガーによる横運動量閾値 20 GeV を通過するが実際には 20 GeV 以下の横運動量を持つ μ 粒子を 50% 削減できる。

MDT 検出器をトリガーに導入するためには、精密運動量測定用の TDC に加え、トリガーに特化した TDC を新たに

導入する必要がある。そのために、要求時間分解能 500 ps (精密測定用) と 10 ns (トリガー用) の MDT ドリフト時間測定を同時に行う 24 チャンネル TDC 回路を FPGA (Field-Programmable Gate Array) 上に構成し、動作検証を行った。

3.2 Kintex-7 FPGA を用いた TDC の開発

研究の第一段階として、CMOS プロセス 28 nm の SRAM (Static Random Access Memory) で構成される Kintex-7 FPGA (Xilinx 社) を用いて、TDC 回路を設計し、性能評価を行った。この FPGA は LHC-ATLAS 実験で利用実績があり、開発ソフトウェア上で配線遅延の分析を詳細に行うことが出来る。

精密測定用 TDC のブロック図を図 3-1 に示す。位相が 90° ずつずれた 4 つの 320 MHz クロックを用いることで、刻み幅 $1/(320 \text{ MHz} \times 4) = 780 \text{ ps}$ を実現させる。4 本の入力配線遅延にばらつきが生じると、時間計測の線形性と分解能が悪化してしまうが、入力配線が接続される 4 つの D フリップフロップを互いに隣り合わせて配置することで、入力配線遅延のばらつきを 200 ps まで抑えられた。結果として、十分な線形性を持つ時間分解能約 250 ps の精密測定用 TDC を構成できることを実証した。

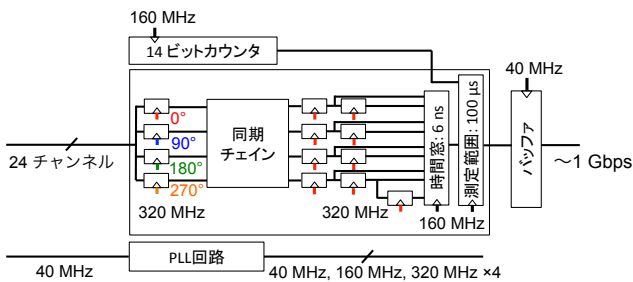


図 3-1 精密測定用 TDC のブロック図。

トリガー用 TDC は、80 MHz クロックを用いて、刻み幅 $1/(80 \text{ MHz}) = 12.5 \text{ ns}$ で設計した。測定された時間分解能は、刻み幅 12.5 ns に対する量子化誤差と無矛盾である 3.6 ns となった。これにより、要求を満たす TDC 回路を Kintex-7 FPGA で構成できることを実証した。

さらに、精密測定用 TDC 回路が Kintex-7 FPGA の限界動作周波数(933 MHz)に近い 880 MHz を用いた刻み幅 $1/(880 \text{ MHz} \times 4) = 0.28 \text{ ns}$ で十分に同期して動作し、温度 -10°C から 60°C の範囲で時間計測性能の変化が小さいことも確かめた。この測定により、より強い動作保証を得ることができた [16]。

3.3 IGLOO2 FPGA を用いた TDC 動作試験

研究の第二段階として、CMOS プロセスにおける MOSFET ゲート長は 65 nm だが、高輝度 LHC-ATLAS 実験に対して十分な高放射線耐性と低消費電力が期待される、

フラッシュメモリベース IGLOO2 FPGA (Microsemi 社) に TDC 回路を実装し、性能評価を行った。

Kintex-7 FPGA での開発で得た知見をもとに D フリップフロップの配置制御を行うことで、全 24 チャンネルで精密測定用とトリガー用 TDC が十分な時間計測線形性を持つことを示し、時間分解能が要求を満たすことを実証した(図 3-2)。また、この TDC の消費電力シミュレーション結果は、ASIC で構成された従来の TDC 回路とほぼ同じ数百 mW となった。

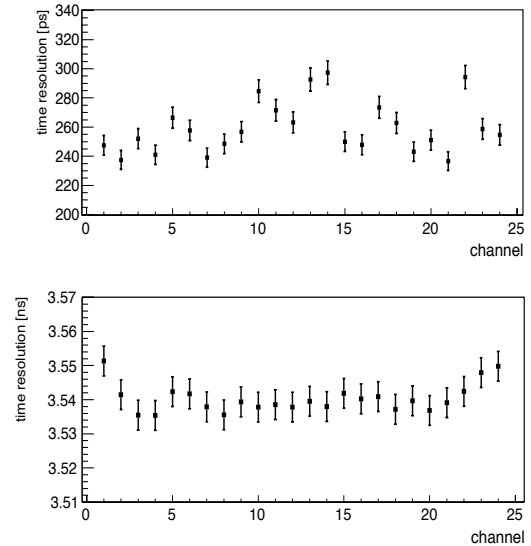


図 3-2 IGLOO2 FPGA に実装した TDC の各チャンネルの時間分解能。上:精密測定用 TDC, 下:トリガー用 TDC。

3.4 IGLOO2 FPGA 放射線耐性試験に向けて

IGLOO2 FPGA の放射線耐性試験を目的として、テストボードを製作した(図 3-3)。高速通信に用いる SFP+(Small Form-factor Pluggable+) を装備することで、高速通信機能の検証を行える仕様にした。また、陽子線照射の影響を切り分けるために、FPGA 以外の素子を、FPGA から離して設置した。今後、ガンマ線、陽子線照射試験を行う計画である。



図 3-3 IGLOO2 FPGA 放射線耐性試験に向けたテストボード。

4 プロジェクト紹介：スーパーカミオカンデにおける近傍超新星観測用DAQの開発（東京大学）

4.1 開発の目的

超新星爆発は重い星が寿命を迎えて爆発する現象だが、その物理過程にはいまだ不明な点が多い。多くの超新星が光学観測によって研究されているが、爆発時のコア付近の情報を直接得ることはできない。そこで光より反応しにくく、星のより内側の様子を知ることができるニュートリノによる観測が待たれている。スーパーカミオカンデ(SK)は超新星ニュートリノの観測に適した大型の水チェレンコフ検出器で、銀河中心付近(10 kpc)での超新星爆発では 8000 ニュートリノイベントの観測が期待される。観測されるイベント数は地球までの距離の 2 乗分の 1 で増加し、ペテルギウス、アンタレスなどの数百光年程度の距離にある星の場合、10 秒間に 3000 万イベントの観測が予想される。しかしこの量は現在のデータ収集システム(DAQ)の処理能力を大きく上回り、爆発直後のデータのうち 20%程度しか記録できない。この問題に対処するための新たな DAQ システムを開発することとなった。

4.2 システムの設計

超新星ニュートリノの 1 イベントで予想される光電子数は 100 個程度で SK の光電子増倍管(PMT)の本数に比べて十分小さいので、1 光電子~1 hit/PMT として検出器内部の全 hit 数からイベント数とエネルギーの積が求められる。そこでシステムは一定時間内に光を検出した PMT の数を記録するものとした。このときシステムの扱うデータ量は常時一定となる。

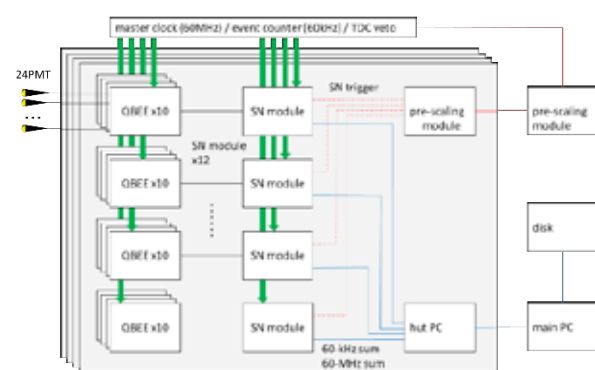


図 4-1 システムの概要。

データの流れは図 4-1 のようになっている。PMT24 本の情報を処理するフロントエンドボード(QBEE)は 17 nsec ごとに、信号のあった PMT の数を LVDS で出力する機能があり、この出力をハードウェア的に読みだして足し合わせる。1 つのモジュールで QBEE 10 枚分、PMT 240 本分の hit 数を読みだして FPGA で処理する。ディスクに蓄積す

るデータ量を減らすため、通常は 1024 周期分の和を取り、17 μ sec の間の hit 数(60-kHz sum)を記録する。これだけの和をとってもダークノイズによる PMT の hit 数の平均的なふらつきは 30 本程度と期待され、超新星爆発ニュートリノの 1 イベント(~120hits)よりも十分小さい。ただし、超新星爆発の前後 1 分間についてはより精度の高いデータを残すため、17 nsec 単位で得られたデータも記録する(60-MHz sum)。60-kHz sum は常時計算機から読み出してディスクに記録されるが、60-MHz sum は各モジュールに搭載した 4GB のメモリをリングバッファ的に用いて常に最新のものを書き込み、超新星爆発検出のトリガーが入力されたとき、トリガーの 30 秒後までのデータを記録してこれを計算機から読み出す。

さらに、超新星爆発による大幅なイベント数増加が期待される時間帯で QBEE 上のバッファがあふれてデータが不定期に捨てられることを防ぎ、継続的に電荷・時間情報を記録するために、メイン DAQ のデータを間引く制御をすることにした。この制御には QBEE の VETO 信号が入力された場合、17 μ sec の間 QTC からのデータを TDC に送らないという機能を用いる。具体的には近傍超新星用のシステムで 17 μ sec 間の hit 数をモニタして大幅なイベント数の増加がみられたときにはメインのデータ収集システムへの制御信号を送るシステムを導入する。17 μ sec の hit 数が十分多く、超新星爆発の可能性が高いと判断できるときに SN トリガーという信号を生成し、12 モジュールごと、全部で 4 つのロジックボードに集める。ロジックボードは SN トリガーの総数と持続時間からイベントレートを予想し、この予想量から間引き量を決定、適切な間隔で QBEE の TDC へ veto 信号を送る。これにより、全 QBEE が同期してデータを間引き、超新星ニュートリノのエネルギーや種類の分布を継続的に測定できるようになる。



図 4-2 近傍超新星観測用モジュール(2 枚一組で設置)。

実際のモジュール(図 4-2)は FPGA(vertex5), DDR-2 DIMM スロット, 2 系統の Ethernet を備えており、2013 年 3 月までに開発および生産を終了した。開発中、高性能の FPGA が必要になったため、回路の大幅な変更や、また必要な電

力が増えてレギュレータを変更が必要となったが、無事完成した。

モジュールのファームウェア開発はFPGAの容量に対して必要な機能が多く、タイミング制約を正しく行わなければならないが、マップ生成の条件指定などに時間がかかったが、2014年9月にSKにインストールし、コミッショニングランを始めた。その後、メインのDAQから得られるデータと、60-kHz sum, 60-MHz sum 間の同期を行い、現在は60-kHz sumのデータを常時一週間分記録している。超新星爆発が起きていない間のデータは随時削除している。また、データの間引きシステムは、誤動作がメインDAQのデータを失わせることにつながるため、慎重にファームウェアを準備しており、この夏の稼働開始を目指している。

5 プロジェクト紹介：超伝導検出器 MKID 用アナログ・ボードの開発 (KEK, 総研大)

5.1 はじめに

私たちは、宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 GroundBIRD[17]に搭載する超伝導検出器 Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) [18]のフロントエンドとなるアナログ・ボードの開発を行った。GroundBIRD 実験に最適化するために、できるだけシンプルで低コスト(デバックなどの開発コストも含む)なものを目指し、結果として、高い汎用性と利便性を有するアナログ・ボードを製作することに成功した。

5.2 超伝導検出器 MKID

MKIDは図5-1に示すような、アンテナと超伝導共振器、読み出し線からなる光検出器である。共振器はそれぞれ固有の共振周波数 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ (L :共振器のインダクタンス, C :共振器と読み出し線の結合で生じるキャパシタンス)を持ち、共振器の長さを変えて共振周波数を設定する。

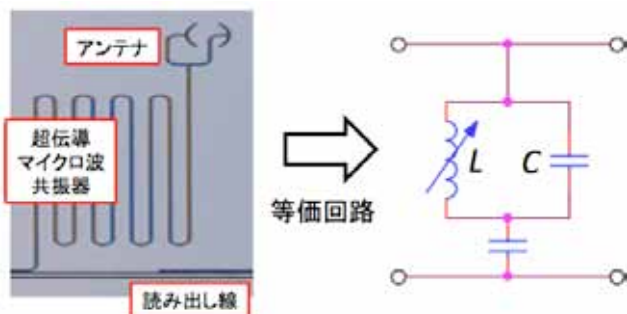


図 5-1 MKID の写真 (左) と等価回路 (右)。

異なる共振周波数を持つMKIDを一对の読み出し線の上にカップルすることで多素子を一気に読み出すこと(多重読み出し化)ができる。GroundBIRD 実験では、一对の読

み出し線で100素子を同時に読み出す。

5.3 アナログ・ボードの仕様策定と製作

GroundBIRD 実験のMKID読み出しに対する要求は、主に次の3つである：

1. 1枚のアナログ・ボードで100素子同時読み出し
2. 1チャンネルあたりのノイズレベルは $< 10^{-5}$ rad
3. 長時間連続稼働で安定した読み出し

これらを実現するために、アナログ・ボードの仕様は次のように定義した：

1. 1枚のボードが持つ帯域は200 MHz
2. ADC, DACの分解能はそれぞれ14-bits, 16-bits
3. 外部冷却ファン不要の基板発熱量 ⇔ 省電力

策定した仕様をもとに製作したアナログ・ボードを図5-2に示す。ここでは紙面の都合、詳細は省くが、1.から3.すべての項目を満すことを確認した(製作と評価の詳細は、参考文献[19]を参照)。



図 5-2 製作したアナログ・ボード「RHEA」。

5.4 読み出し試験とノイズ測定

開発したアナログ・ボードを GroundBIRD 実験の読み出しシステムに組み込んで、実際のMKID使って行った読み出し試験の結果を図5-3に示す。MKIDの共振状態の変化(振幅と位相の変化)が検出できることを確認した。また、DAC出力を検出器に通さずADCに入力して、読み出しシステムのノイズレベルの測定も行った。図5-4に示すように、1チャンネルあたりのノイズレベル $< 10^{-5}$ radを達成していることを確認した。

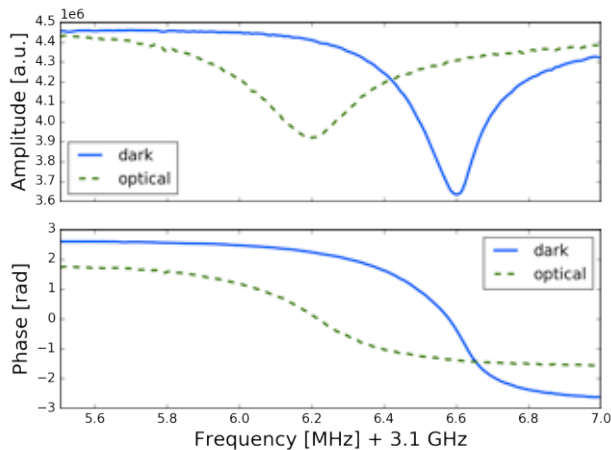


図 5-3 MKID を 250 mK 以下に冷却して行った読み出し試験。アンテナに光があたっていないとき（実線）と光を受けたとき（点線）で振幅（上）と位相（下）が変化している様子が確認できる。

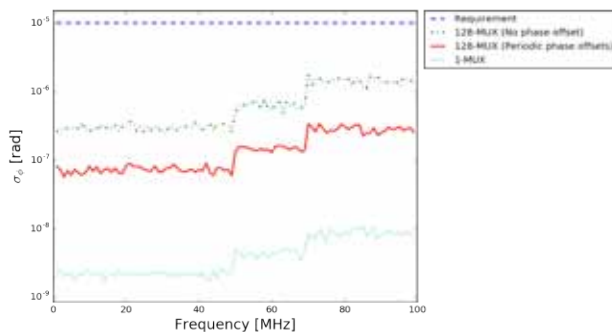


図 5-4 読み出しシステムのノイズレベル（位相読み出し）。128 素子同時読み出しにおいて、GroundBIRD 実験の要求値 $< 10^{-5}$ rad を達成した。

5.5 まとめ

私たちは、超伝導検出器 MKID の読み出しに用いるアナログ・ボードを開発した。製作したアナログ・ボードは、すべての仕様項目を満足し、実際の MKID を使った読み出し試験で共振状態の変化を検出することに成功した。さらに、読み出しシステムのノイズレベルに対する目標も達成し、現在は長期にわたる CMB 偏光観測へ向けて、デッドタイムなしに 100 素子同時読み出し可能な FPGA のマルチ・チャンネル・ロジックの開発を行っている。

最後に、本開発は Open-It のプロジェクトとして、池野正弘さんや内田智久さんをはじめ、多くの方々の支援と協力をいただきました。エレキ開発初心者である筆者に、的確な知識と丁寧な指導を頂きましたことに感謝いたします。

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] 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] Open-It Web 教育・連携ページ, <http://openit.kek.jp/training>.
 [8] DAQ-MW Web サイト, <http://daqmw.kek.jp/>.
 [9] 長坂康史, 千代浩司, 技術総合誌「OHM」Headline Review, pp.6-7, 2011 年 9 月号.
 [10] Open-It 若手の会 Web サイト, <http://openit.kek.jp/training/wakatetop>.
 [11] 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).
 [12] 大石航, 織井安里, 高エネルギーニュース **33-3**, 211 (2014).
 [13] 前田剛, 山本康嵩, 高エネルギーニュース **34-3**, 224 (2015).
 [14] 計測システム研究会 @RCNP Web ページ, <http://openit.kek.jp/workshop/2015/dsys/main>.
 [15] ATLAS collaboration, ATLAS Phase-II Upgrade Scoping Document, CERN-LHCC-2015-020 (2015) [LHCC-G-166].
 [16] Y. Sano et al 2016 JINST 11 C03053.
 [17] S. Oguri et al., J. Low Temp. Phys. 176, 691-697 (2014).
 [18] P. K. Day et al, Nature 425, 817-821 (2003).
 [19] 石塚光, 総研大修士論文 (2015).