

LHC-ALICE 実験・FoCal-E 検出器のための前段信号処理電子回路の開発

筑波技術大学 産業技術学部 産業情報学科

稲葉 基

for the ALICE FoCal collaboration

キーワード：高エネルギー重イオン衝突実験，前方光子検出器，電子回路。

本研究では、平成 26 年度教育研究等高度化推進事業、競争的教育研究プロジェクト事業(産業技術に関する研究)として、LHC-ALICE 実験に導入を計画している前方光子検出器のプロトタイプの評価するための電子回路を開発し、その成果を平成 27 年 3 月に開催された日本物理学会第 70 回年次大会で報告した。

スイス連邦共和国ジュネーブ近郊の欧州原子核研究機構(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を用いた高エネルギー重イオン衝突実験(ALICE)のアップグレード計画の1つとして、衝突初期の状態をさらに詳しく調べる前方光子検出器(FoCal)とその電子回路の開発を進めている。FoCal は、直接光子を検出するための電磁カロリメータ(FoCal-E)とジェット等を観測するためのハドロンカロリメータ(FoCal-H)を組み合わせたハイブリッド検出器になる予定で、FoCal-E の部分は、高速信号読み出しのシリコンパッドモジュール(PAD)と高位置分解能のシリコンピクセルモジュール(MAPS)で構成される。

FoCal-E PAD の検出部は、大きさ約 $94.3 \times 94.3 \text{ mm}^2$ 、厚さ約 3.5 mm のタングステン板と 8×8 のマトリクス状シリコンフォトダイオード(PD)アレイを接着し、その上にフィルムプリント基板を張って、各電極間をボンディングワイヤーで接続している。図 1 は、米国オークリッジ研究所(ORNL)によって製作された検出部のプロトタイプの1枚である。この検出部を4層積み重ねて1つのモジュールを構成し、同じ位置関係にある PD の信号電流を重ね合わせて読み出している。プリント基板には、各 PD に 100V の逆バイアスを印加するためのチップ抵抗と信号に含まれる直流成分を除去するためのチップコンデンサが実装されている。

平成 26 年 9 月に CERN の PS テストビームラインで、PAD と MAPS を一体化した状態すなわち FoCal-E としての初めてのビームテストをおこなった。図 2 は、その実験の様子である。中央の大型電動ステージに載せた金属製暗箱の中に FoCal-E の検出器一式が入っており、すぐ横の棚に信号読み出し電子回路等を配置した。

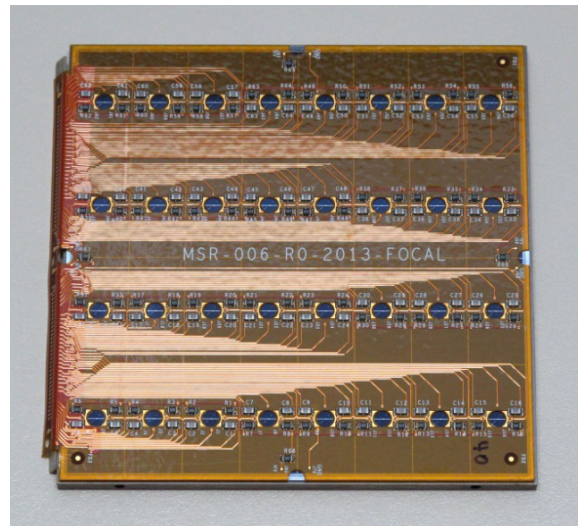


図 1 FoCal-E PAD の検出部の外観

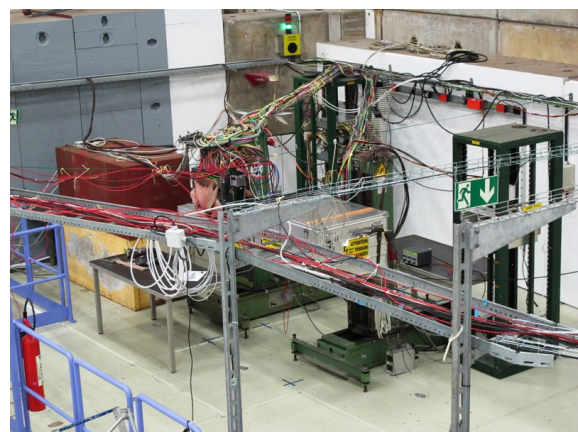


図 2 CERN の PS ビームラインでの実験の様子

本研究では、まず PS テストビームラインでの実験に向けて、図3のトリガー信号処理回路を開発した。PAD 用データ収集システム(DAQ)と MAPS 用 DAQ は、互いに独立して動作しており、2つの DAQ のデータを統合して、検出器に入射した高速荷電粒子ごとに解析をおこなうためには、それぞれのデータに共通のトリガー情報を追加しておかなくてはならない。高い位置分解能を有する MAPS は、信号チャンネル数が多く、PAD と比べて、データ処理に長い時間を必要とする。そこで、MAPS 用 DAQ がデータを1回処理する度に1ずつカウントアップされる10ビットの平行信号を読み出して、シリアル信号に変換し、それをPAD用 DAQ がデータとして認識するためのタイミング信号等を加えることができるトリガー信号処理回路を設計・製作した。MAPS 用 DAQ とは、電源およびアースラインを分離するために、フォトカプラによる光結合で平行信号を読み出し、PAD 用 DAQ へは、LVDS 規格の高速信号として HDMI コネクタから送信している。

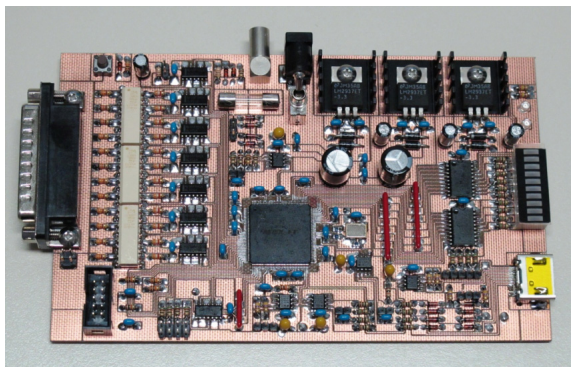


図3 開発したトリガー信号処理回路の外観

次に、温度の変化に敏感な PAD の検出部やアナログ信号処理回路の温度の管理のために、図4の温度計測回路を開発した。図5は、小型液晶ディスプレイ(LCD)を取り付けたアルミケース内に、図4の温度計測回路を入れた状態である。そして、図6は、デジタル温度センサの様子である。温度計測回路は、個々のデジタル温度センサと1本の信号線を使って相互通信をおこない、データを読み出して、各部の温度が許容範囲内におさまっているかどうかを判別し、その結果をLCDに表示する。温度に異常があれば、高輝度LEDが赤く点滅するとともに、大音量のブザーが鳴る。USB 2.0 インターフェイスを搭載しており、そのUSBコネクタにパソコンを接続しておくと、温度データ等がパソコンへ転送され、保存される。温度センサは、それぞれ固有のIDを持っているため、1本の信号線に20個程度まで並列接続することができ、温度計測回路1台で160ヶ所の温度を同時に計測することができる。



図5 温度計測回路をアルミケースに入れた状態

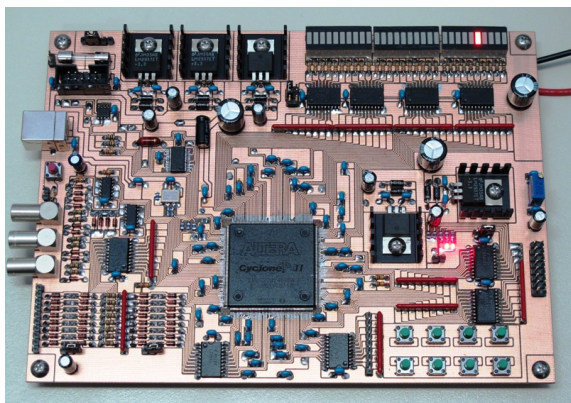


図4 開発した温度計測回路の外観

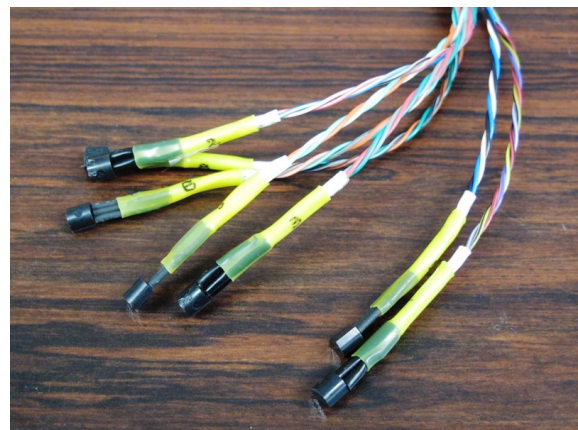


図6 デジタル温度センサの様子

PSテストビームラインを利用したFoCal-Eの初めてのビーム実験を通して、いくつかの課題が明らかとなった。1つ目は、PADの4つのPDごとに信号電流を重ね合わせて読み出している部分の集積回路の発熱で、2つ目は、その信号線に混入した大きな電氣的ノイズである。そして、3つ目は、MAPS用DAQのデータ処理回数と図3のトリガー信号処理回路が受け取るべき10ビットパラレル信号との間にずれが生じていたことである。1つ目の課題は、2つ目の課題とも関係しており、信号線に混入した電氣的ノイズが集積回路の消費電力を大幅に増やしたことが一因と考えられた。実験中の試行錯誤によって、電氣的ノイズの大部分が電源ラインを通過して混入してきていることを突き止め、専用の電源回路を開発すれば、1つ目と2つ目の課題を同時に解決できる可能性があることが分かった。また、3つ目のトリガー情報が一致しない原因については、MAPS用DAQを担当しているオランダ王国ユトレヒト公立大学の研究者らが調査を進める一方で、10ビットパラレル信号のもととなる複数のパルス信号を直接読み出すことができる多機能なトリガー信号処理回路を新たに開発することにした。

平成26年11月にCERNのSPSテストビームラインで、高めのビームエネルギーによるFoCal-Eの2回目のビーム実験をおこなう機会を得ることができ、それに向けて、専用の電源回路の開発を進めた。図7は、SPSビームラインでの実験の様子である。PSビームラインのときと同様に、金属製暗箱の中にFoCal-Eの検出器一式を入れ、大型電動ステージに載せている。左側に見えているのは、ビームパイプである。図8は、暗箱の中の様子で、アルミケースに入れたPAD用の高効率かつ低リップルの絶縁型直流高電圧電源回路と直流低電圧安定化電源回路が追加されている。新たに開発した専用の電源回路は、PADに混入していた電氣的ノイズを減らすことに有効で、アナログ-デジタル変換した後のペDESTAL分布の幅をおよそ3/4まで改善することができた。また、電源回路の出力電圧を変えられるようにして、発熱していた集積回路への印加電圧を動作限界ギリギリまで下げて安定化させることによって、発熱の問題も同時に解決した。

その後、10ビットパラレル信号に加えて、3系統の高速パルス信号の入力にも対応した図9の多機能なトリガー信号処理回路を完成させ、搭載しているFPGA(プログラム可能な論理デバイス)に制御プログラムを書き込んだ。平成27年7月に、PAD用DAQとセットでユトレヒト公立大学へ送り、そのMAPS用DAQと同期させる試験をおこなう予定である。

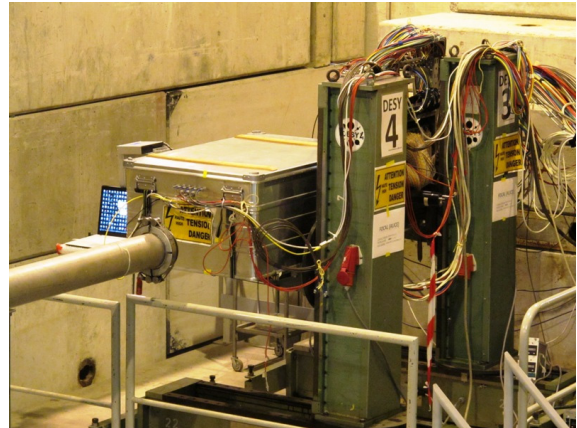


図7 CERNのSPSビームラインでの実験の様子

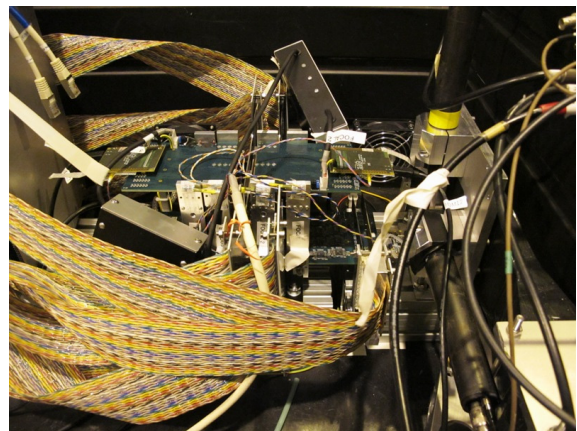


図8 開発した専用の電源回路を含むFoCal-Eの様子

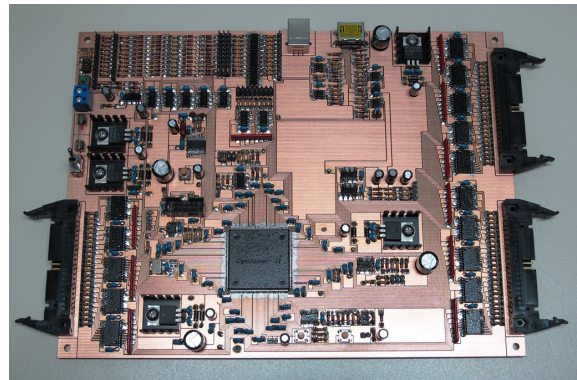


図9 開発した多機能なトリガー信号処理回路の外観

本研究では、LHC-ALICE 実験に導入を計画している FoCal-E の性能を評価する目的で、PAD 用のアナログ信号検査回路、トリガー信号処理回路、温度計測回路、絶縁型直流高電圧電源回路、直流低電圧安定化電源回路等を開発した。そして、その成果を平成 27 年 3 月に早稲田大学早稲田キャンパスで開催された日本物理学会第 70 回年次大会で「稲葉 基 for the ALICE FoCal collaboration: LHC-ALICE 実験のための前方光子検出器(FoCal)プロトタイプ評価用電子回路の開発」として報告した。また、2 回のビーム実験の結果を含めて、平成 27 年 5 月にイタリア共和国で開催予定の 13th Pisa Meeting on Advanced Detectors - Frontier Detectors for Frontier Physics - へ概要を提出し、ポスターセッションでの発表採択通知を受け取った。

今後は、平成 27 年度中に CERN の PS テストビームライン(2~10 GeV)と SPS テストビームライン(30~200 GeV)で FoCal-E の 3 回目と 4 回目のビームテストをおこない、エネルギー分解能等を詳しく評価していくとともに、さらに高速かつ広ダイナミックレンジで PAD の信号を読み出すシステムの開発を進める予定である。