

Ozaki Exchange Program 成果報告

広島大学大学院先進理工科学研究科

松谷 奏

matustani@quark.hiroshima-u.ac.jp

2025 年（令和 7 年）3 月 31 日

1 概要

私は日米海外科学技術協力事業 (Ozaki Exchange Program 2024) に参加し、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に 9 月 11 日から 2 月 7 日の約 3 か月間滞在し、将来実験計画の ePIC 実験に使用する粒子識別検出器 AC-LGAD の読出し用集積回路 (ASIC) の開発研究を行った。ASIC の電荷注入に対するデジタル信号の解析を行い、その出力データ構造の議論と理解に努めた。また、デジタル信号の解析については私が主体となって開発研究に貢献した。

理課題に取り組む。今後の建設と実験の進展により、標準模型を超えた新しい物理の発見が期待されている。

表 1. EIC が目指す主な科学的インパクト。どれも精密測定が可能とする新しい物理の発見である。

EICが達成する科学的インパクト

- 標準模型の枠を超えたハドロン内部の理解
- グルーオンで満たされた新規物質(CGC)の探索とその性質解明
- 原子核中のグルーオン分布の解明

2 活動内容

2.1 研究背景

2.1.1 Electron Ion Collider (EIC)

EIC は、アメリカにある米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に建設が計画されている次世代加速器である。本加速器は、世界初となる偏極電子と偏極陽子、さらには原子核を衝突させることが可能であり、ハドロン物理学における未解決問題に対する画期的なアプローチを提供する。[1]

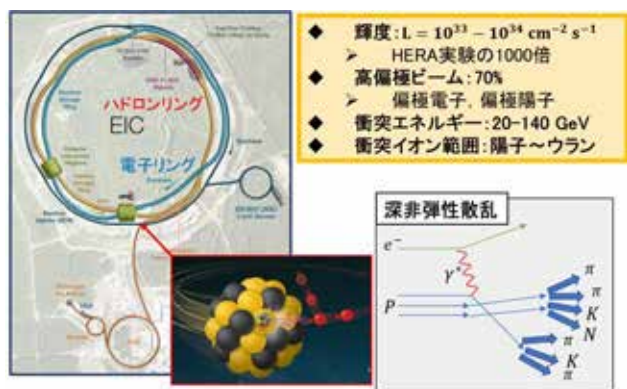


図 1 EIC 加速器の概要図(左)および、特徴(右上)。また、偏極電子と偏極陽子の衝突時の現象「深非弾性散乱」について(右下) 示している。下の青矢印は陽子のパートンを描画している。

図 1 にあるような、高い偏極度、広範なエネルギー領域、極めて高い輝度を活かし、EIC は核子のスピンの起源、グルーオン飽和、カラーガラス凝縮の確認といった重要な物

2.1.2 electron Proton/Ion Collider (ePIC) 実験

EIC における主要な検出器群の一つが ePIC である(図 2)。ePIC は HERA 実験よりも高精度な粒子識別を可能にし、特に小 Bjorken- x 領域の探索と高輝度を活かした高精度測定を実現する。

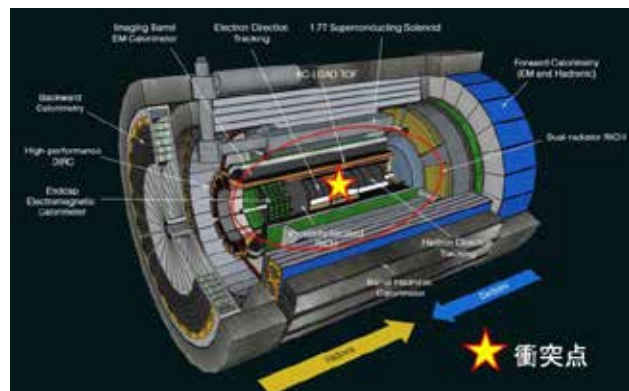


図 2 ePIC 検出器群の概要図。衝突点を囲うように、また前後方領域をすべてカバーするように様々な用途の検出器が置かれている。TOF は赤丸で囲われた領域に設置する。[1]

粒子識別の向上は、深非弾性散乱 (DIS) の精密測定に不可欠である。ePIC には、低運動量粒子の識別を担う Time-of-Flight (TOF) 検出器が導入されており、これは過去の e-p 実験である HERA 実験では未実装であった。TOF は $K/\pi/p$ の識別を行い、前方領域を FTOF が、衝突点を囲うように BTOF がカバーする(図 3)。特に、ePIC-Japan グループは BTOF の開発を主導している。

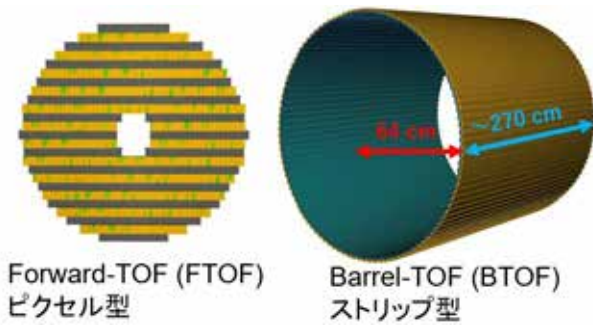


図3 FTOF(左)とBTOF(右)のイメージ図。

TOF 検出器には 30 ps の時間分解能、30 μm の空間分解能が求められる。また、物質にも制限があり、相対的質量厚(マテリアルバジェット)が数%程度となるようにしなければいけない。ここで、これらの条件をすべて満たす夢のような検出器がある。

2.1.3 AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD)

AC-LGAD は、シリコン半導体検出器の一種であり、高い時間分解能と位置分解能を両立できる特徴を持つ。従来の LGAD と同様に、電子雪崩増幅を利用するが、AC 結合による信号読出しを可能とすることで、高精度な位置検出が実現される。(図 4)

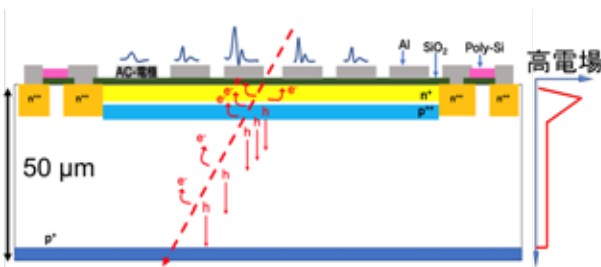


図4 AC-LGAD の構造イメージ図 [2]

AC-LGAD の主な特徴は以下の通りである。

- 表面にある薄い増幅層 (図 4 黄色と水色部分) による電子雪崩増幅によって早い応答信号が得られる
 - AC 結合を利用した、不感領域のないすべての電極に一樣な増幅層による電荷共有アプローチによってシグナルの加重平均をとって精度良い位置を決定できる
- これらの特徴が、数 10 ps の時間分解能と数 10 μm の位置分解能を達成可能にしている。

また、AC-LGAD はさまざまな読出しパッドに対応可能である。実際に FTOF はピクセル型 AC-LGAD, BTOF はストリップ型 AC-LGAD を採用する。(図 5)

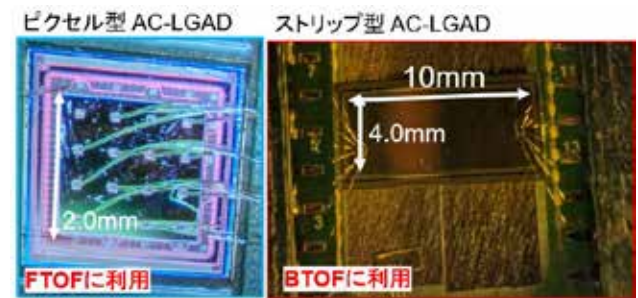


図5 ピクセル型 AC-LGAD (左) とストリップ型 AC-LGAD (右)

2.1.4 EIC Read Out Chip ver.0 (EICROC0)

検出器には AC-LGAD の信号を読むための読み出し集積回路 Application Specific Integrated Circuit (ASIC) が必要となる。EICROC0 はピクセル型 AC-LGAD のために作られた初期プロトタイプ ASIC である。(図 6)

EICROC0 は 4×4 の計 16 ch の読み出しパートを持ち、それは AC-LGAD のチャンネル数に対応している。最終的にはチャンネル数の拡張を行い、 32×32 まで読み出せるようにする。また消費電力の低下させることも開発課題のひとつである。

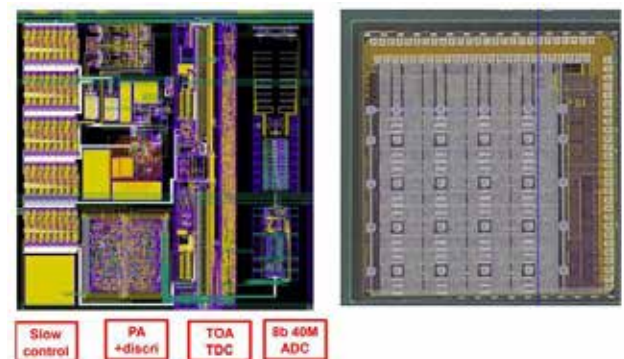


図6 EICROC0 の写真。EICROC0 には信号の時間情報と波高情報をデジタル出力する機能が搭載されている。 [3]

2.2 研究内容

今回のBNL派遣で、私はASICの解析方法や性能評価方法についてまなび、EICROC0の開発があまり進んでいなかったデジタルパートの解析を行った。また、広島大学でのテストや設備の再現にあたり、BNLでのさまざまな試験内容について学んだ。

2.2.1 デジタルパート解析のためのテストベンチ製作

EICROC0 のデジタル解析を行うにあたって、出力データの電荷量依存性を調べるために必要なテストベンチを製作した。EICROC0 ように開発されたテストボードとコマンドを実行するための FPGA を用いて、自分のパソコンからコマンドを送れるようにした。また、テストボードからアナログ波形を見るために、オシロスコープにつなげて波形観測も同時に行えるようにした。(図 7)

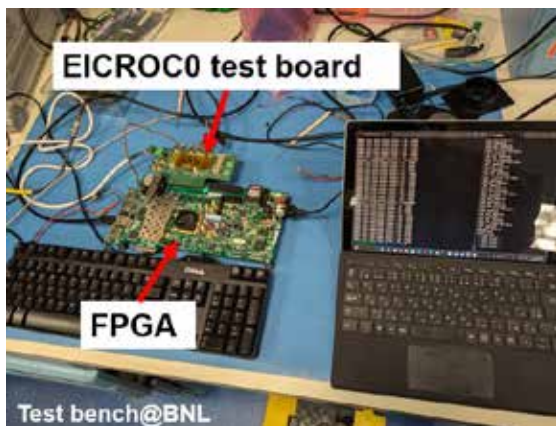


図 7 テストベンチの写真。写真の左側にオシロスコープがある。

2.2.2 デジタルパート解析結果

はじめに、アナログ波形を確認し、電荷量による信号の波高の変化を観測した。(図 8)

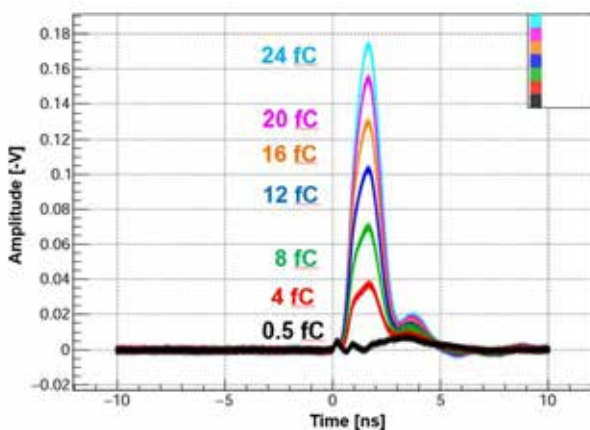


図 8 各電荷量によるアナログ波形のプロット。電荷量と波高に正の依存性があることがわかる。

次に、デジタル出力値の TDC と ADC の分布から、ASIC の Jitter と ADC 値と波高の関係について解析を行った。TDC から得られる Jitter 値は高電荷量で安定した値を取り、約 13 ps の時間分解能であった。これは想定されている要求性能を満たしており、プロトタイプの段階で高性能な ASIC であるといえる。ただし、チャンネル数の増加や複数チャンネルの信号によるクロストークなど、懸念される

べき項目はたくさんあるので今後も改良および開発を続けていく。

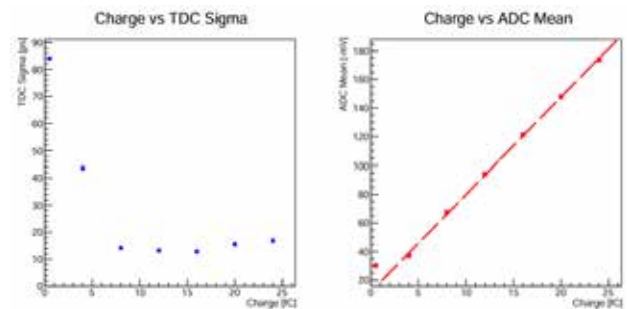


図 9 横軸に電荷量を取った、TDC 値から算出した Jitter (左) と、ADC の平均値 (右)。各電荷量について 10000 回電荷を注入しており、その分散および平均を利用している。

2.2.3 解析結果についての報告

これらの解析結果および途中経過については毎週の BNL 内ミーティングで報告をし、月 1 回程度の EICROC0 開発チームに対しての報告を行った。また、最終日には BNL でおこなってきた解析のまとめとして報告会を行い 3 時間にわたる議論およびフィードバックをおこなった。

3 活動期間中の生活

日常生活については BNL 内の efficiency apartment を利用した。ワンルームのバストイレ付で、キッチンもついていたので、長期間の生活も無事に過ごすことが出来た。食事については、日本人スタッフが滞在している期間は現地のお店を紹介してもらい、連れて行ってもらえた。また、ランチタイムは受け入れ先の Prithwish さんや同じチームの学生とともに外食やランチボックスを食べた。

しかし、車を持つことができなかったため、不便な面もあった。BNL 内はシャトルバスが運行しており、対応時間内であれば電話で来てくれたが、ショッピングに関しては週に 2 回しか運行しておらず、そのときに食材を買いためで自炊での生活をしていた。基本的には日本人スタッフはいなかったため、自炊がほとんどだったが、そのおかげで料理スキルは身についた。

運動に関しては BNL 内であれば安全なため、ランニングやサイクリングを行うことが出来た。しかし、滞在期間が真冬だったのであまり外での運動は推奨しない。また、週 2 回体育館でバスケが行われていたり、バレーが行われていたりしたので、解析に余裕があるときは参加して体を動かした。おかげで体型は保ったまま過ごすことができた。

4 謝辞

ひとりでの長期海外滞在というのは今回が初めてで、不安もありましたが、現地で手を動かしている方たちと直接議論できる機会というのはとても貴重で研究活動の上で欠かせない時間となりました。アメリカの文化にも触れ、一人の研究者としての生活をし、自分の視野は確実に広がったと感じています。今回このような機会を与えてくださった Ozaki Exchange Program 事務局の皆さまと、出張手続きやその後のサポートをしてくださった KEK 国際企画課の皆さま、受け入れ先の Alessandro, Prithwish, BNL AC-LGAD 開発チームの皆さま、現地でお世話になった ePIC-J の皆さま、そしてこのプログラムに推薦していただきたくさんのことを教えていただいた指導教員の志垣さんに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <https://www.bnl.gov/eic/>
- [2] <https://arxiv.org/pdf/2201.07772>
- [3] [https://indico.in2p3.fr/event/33456/contributions/144323/attachments/87586/132251/EICROC_10oct24%20\(2\).pdf](https://indico.in2p3.fr/event/33456/contributions/144323/attachments/87586/132251/EICROC_10oct24%20(2).pdf)