

令和 2 年 7 月 15 日現在

機関番号：37301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02903

研究課題名(和文)ALICE実験GEM-TPC連続読出を実現する新データ収集回路の要素開発

研究課題名(英文)Development of next generation continuous readout DAQ for the ALICE GEM-TPC

研究代表者

大山 健(Oyama, Ken)

長崎総合科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：10749047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：LHC ALICE実験は2021年の第三期高輝度LHCの運転開始に向け準備を進めている。本研究では、ALICE実験の成功のカギを握る高速データ収集・即時解析システムの開発を実施した。新型GEM-TPCの連続読み出しの実現を目指し、最新技術(FPGA, PCI Express Gen3)をデータ収集装置として組み込むための要素技術の開発と実証機評価を行った。さらに、多数の計算機ノードと検出器前段電子回路を自動制御するためのコントロール・システムの開発を実施した。また、本研究で得られた成果及び技術の、ALICEの将来計画やJ-PARC等の次世代高輝度実験における応用可能性も検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ALICE実験に代表される高エネルギー原子核実験では、加速器輝度の向上に伴い生成される二次粒子の粒子密度が増加し、ラビディティあたり2000に達する。そればかりでなく、近年はこのような高粒子数密度の環境下で重フレーバのような稀なプローブを低運動量まで測定することが要求される。このような条件下では、ハードウェアトリガを構築し、イベント取得頻度を抑える方式はほとんど不可能となり、代わりにトラッキングデバイスのデータをオンラインで全て取得・解析し、記録するより他ない。本研究はこのような次世代実験が抱える問題をいち早く解決するものであり、今後の実験技術にとって欠かせない基礎技術を確認したものである。

研究成果の概要(英文)：The ALICE experiment at the LHC is now preparing for LHC Run-3 program planned to start in 2021. In this research, we developed high-throughput data acquisition and online analysis system as a key technology for the success of the upgraded ALICE experiment. To realize continuous readout scheme for the new GEM-TPC of ALICE, we built and evaluated new data acquisition system using the latest technology components (FPGA, GPU, PCI Express Gen3). Furthermore, we developed automatic control and monitoring system for large scale deployment of such a data acquisition system. We also made consideration of the possibility to apply these results and technology to future ALICE detectors and next generation high luminosity nuclear experiments such as J-PARC heavy ion experiment.

研究分野：高エネルギー原子核衝突実験

キーワード：高エネルギー原子核衝突実験 クォーク・グルーオン・プラズマ データ収集系 TPC 粒子検出器 FPGA アクセラレーション HPC

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

ALICE 実験は、欧州原子核研究機構(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)における史上最高エネルギー原子核実験である。その主目的は、鉛原子核同士の衝突により史上最高温度の「非閉じ込めクォーク物質」を生成しその性質を解明することにある。これにより、自然界の四つの力の一つである強い相互作用が織りなす世界を本質的に理解することが可能となる。我々は2010年からのLHC第一期実験で、核子対あたり2.76 TeVの鉛-鉛衝突データを通算340時間取得した。これは蓄積ルミノシティ 0.1 nb^{-1} に相当する[1]。衝突により創った極限状態物質の流体的性質等、多くの新たな知見を見出した。その後、クォーク物質のさらなる精密測定を次の目標とし、ALICEの大幅な高度化に向けて舵を切った。

クォーク物質の精密測定を多角度から行うため、我々はそれまで以上に重フレーバ(c, b)を積極的に用いた測定が必要と判断した。重クォークの質量は量子色力学のカイラル対称性の破れによる質量獲得機構にはほとんど依存せず、高温下でも安定したプローブとして注目されていた。当時特に議論されていたのは、超高温クォーク物質の中で重クォークが果たして熱的、即ち軽クォーク(u, d)とともに熱平衡状態を達成するのか、であった。そのような熱的な重クォークは、低運動量のハドロン等に崩壊する。このために、重フレーバ起源の稀なハドロンを、可能な限り低運動量($<2 \text{ GeV}/c$)まで測定したいと考えた。そのために必要な蓄積ルミノシティは、これまでALICEで取得したデータの100倍となる。そこで我々はALICEの主要荷電粒子トラッキング装置であるTPC(Time Projection Chamber)の大幅機能増強を計画した[2]。しかし、長期にわたる考察の末、これを達成するには次の3つの大きな技術的問題があることが分かった。

(問題1) 背景粒子密度が然程大きくなく、目的とする事象が稀にしか起こらない場合は、高運動量粒子等を識別するハードウェア・トリガ(HWT)を構築し、突出した事象のみの検出器データを読み出せば良い。しかしLHCでは単位ラピディティあたりの背景粒子密度が2000を超え、重クォーク起源の最終生成物の運動量が背景粒子の平均運動量程度となるため、HWTは最早機能しない。

(問題2) HWTに依存したシステムでは、事象データ読み出し毎に一定の不感時間が存在する。TPCの不感時間は $500 \mu\text{s}$ である。加速器の輝度をいくら向上しても、最大読み出し頻度が2 kHzに限られる。稀なイベントを見つけるために十分なトリガ・ライブ・タイム(有効計数時間)として、例えば25%を確保すると、最大読み出し頻度は500 Hz程度と落ち込む。この条件でデータ収集に3年間を費やしたとしても目的とする蓄積ルミノシティの2%に達しない。この不感時間の要因は、ワイヤ増幅型TPC特有のゲート(gating grid)の存在である。

(問題3) 上記問題をクリアし、読み出し頻度を100倍の50 kHzまで向上したとしても、そのデータを処理・記録出来ない。第一期実験では、HWTが選択した70 GB/sの検出器データをPCクラスタにて200 MB/s程度に圧縮し、記録していた。しかし同方式をそのまま用いて100倍のデータスループットを達成することは、規模・コストの面で非現実的である。

上記の問題1,2を解決する手段として様々な可能性を追求した末、我々は遂にHWTを破棄し、TPCをトリガ無しで連続的に動作可能なものに作り替え、全衝突事象を記録・解析するしかない、という結論に至った。

さらに検討を進めるにつれ、浜垣(連携)・郡司(分担)らを中心とした我々の研究によって、問題1,2がGEM(ガス電子増幅装置)を用いることで解決可能なことが明らかになった[2]。多段GEMを使いイオンの逆流を阻止することでTPCのゲートを廃止可能、というのが我々の結論だった。こうして、GEM-TPCにより、読み出し頻度の概念を無くし、連続読み出しを行うTPCのアイデアが固まった。その後我々は詳細なR&Dを経てGEM-TPCに向けた量産体制に入った。

2. 研究の目的

本研究は、2021年の第三期高輝度LHCの運転開始に向け、上記で残された問題3を完全に解決する事を目的とし、FPGA(Field Programmable Gate Array)と汎用CPUを用いた「超高密度広帯域・トリガレスデータ収集システム」の実現性を証明する。FPGAの集積度、速度、機能は、昨今産業、通信、金融における需要のため急速に発達しており、一般的CPUが苦手とする高スループット・高度並列処理を得意とする。現在最高度の製品は、単体で数十GB/sのデータ入力・処理を可能とし、本研究の用途に相応しい。FPGA上に我々が使用したい解析アルゴリズムをどこまで実装できるか、その限界を定量的に確認することも大きな目標の一つである。

また、本研究はALICE GEM-TPCはもとより将来の高輝度高エネルギー加速器実験において必要不可欠となる要素技術の開発・実証の試みでもある。FPGAを組み合わせた、完全トリガレス連続読み出し型データ収集システムは、多くの新たな可能性を生み出す。実験物理学におけるデ

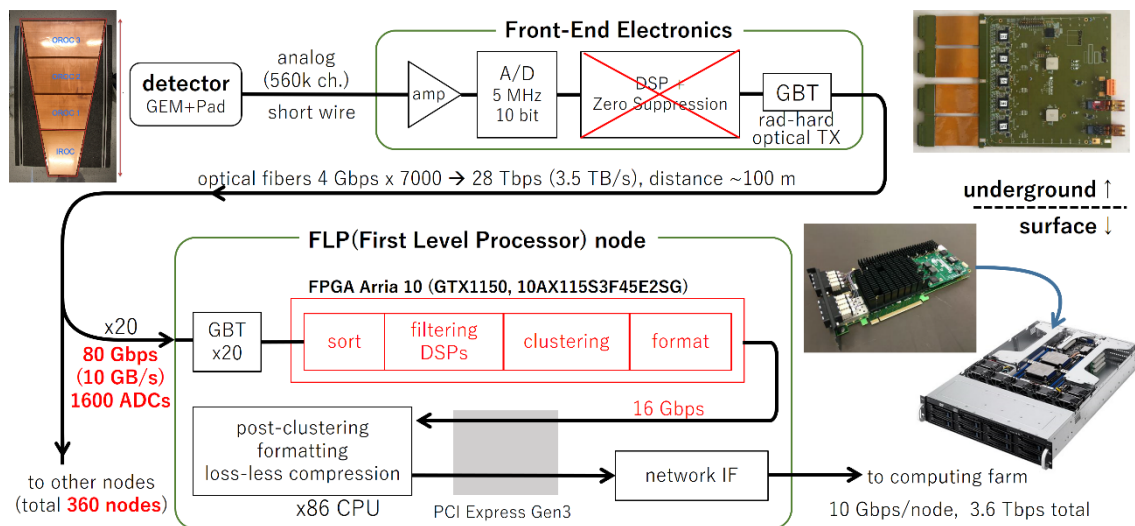


図 1: 本研究で開発した FLP を含めた GEM-TPC 読み出しシステムの構成

一タ収集系の設計思想そのものを覆すばかりでなく、将来多くの分野で応用されると期待する。また、計算器ノードあたりのコストは 150 万円以下を想定しており、これはコストあたりの計算性能においても画期的であり、物理学のみならず産業等においても注目される。従って、今回の研究では GEM-TPC に焦点を絞っているが、ALICE の様々な将来計画、例えば日本 ALICE 組織が開発に強く関わっている FoCAL (前方カロリメータ) 計画、ミューオン測定システムの増強計画 (MFT)、さらには ALICE に限らず、J-PARC 重イオン計画等におけるデータ収集システムにおける応用も視野に収める。

3. 研究の方法

ALICE 実験高度化に向け、ハイエンド FPGA を計算機に組み込んだ超高密度高帯域データ収集システムのプロトタイプの完成を目指し、国内外研究機関の研究者・大学院生で編成したプロジェクトチームを率い、本研究において特に時間を要する FPGA ファームウェア (回路を実現するプログラム) の開発を中心に研究を遂行した。作成されたファームウェアの動作を実機上で確認し、性能評価を行い、量産に向けた知識・技術の蓄積を行った。わが国機関が深く関わる他の次期 ALICE 検出器、さらには将来の大強度ビームを用いた実験計画 (J-PARC など) にも転用可能なものを目指して研究を進めた。

データ収集・即時解析のためのデバイスとして、市場にて入手可能な一般的 FPGA の中でも、最大規模の FPGA として Intel/Altera の Arria10 FPGA を用いた。検出器データを光ファイバ経由にて受信し、FPGA 上で各種デジタル・フィルタや解析アルゴリズムを適用し、データを圧縮してから CPU に送り出す仕組みとした。FPGA に光ファイバ受信部を接続し、多数の検出器前段電子回路からのデータを受信するためには、本研究の準備段階より我々 ALICE 共同体が LHCb 実験と共同開発している FPGA ボードを用いることとした。

図 1 にこの FPGA ボードを用いた GEM-TPC のデータ処理の流れを示す。黒い太線がデータの流れを示す。検出器 (GEM-TPC, PAD 読出) 近傍にはアンプ、A/D コンバータ (ADC, 5MHz, 10bit) から成る前段電子回路 (Front-End Electronics) が置かれる。ADC のデータは、従来実験ではトリガ情報を用いてバッファリング、DSP (Digital Signal Processor) による圧縮をするのが常套手段であったが、本研究ではそれらを使用しない。図中、前段電子回路の一部が×で示されているのは、このことを表す。前段電子回路は、CERN が開発した GBT [3] と呼ばれる光プロトコルにて実験装置外に全データを転送する。光送信部は放射線耐性を持つカスタム ASIC とレーザーダイオードから構成される。光ファイバの数は 7000 本に上り、それぞれは 4 Gbps の転送速度を持つ。総スループットは 28 Tbps (3.5 TB/s) となる。後段には FLP (First Level Processor) と呼ぶ汎用型 PC サーバを 360 台用意し、それぞれに前出の FPGA ボードが組み込まれている。これらの FPGA ボードはそれぞれが ADC 1600 チャンネルに相当する 80 Gbps のデータを途切れなく受け取り、検出器波形データを同時処理する。FPGA では、その内部に構築する DSP によりデータを前処理し、さらに時間・空間方向への相関を探索し、荷電粒子が TPC 内に残した電子シグナルを識別する。これらの発見された電子シグナルはクラスタと呼ばれ、その特徴データ (重心・強度) のみが PCI Express Gen3 バスを介して後段の CPU に送られる。CPU ではこれらのデータの後処理を行い、ロスレス圧縮を施し、さらに後段の解析用クラスタに送る。これらの処理は全て GEM-TPC から掃き出される全データに対して時間の途切れなく連続的に行わねばならない。FPGA を搭載した FLP は同様の処理を一般的 PC で処理した場合に比べて 50 倍以上の速度を誇る。本研究では、このシステムの試作を完了し、そこに搭載されるファームウェアを開発し、テスト運用・評価を行った。

module	ALMs(k)	%	M20Ks	%	DSPs	%
peripheral	7.1	1.7	116	4.3	54	3.6
GBT decoder	10.3	2.4	0	0	0	0
sorter	44.0	10.0	40	1.5	0	0
CMF	8.5-64.1	2-15	0	0	0	0
clusterizer	167.9	39.3	906	33.4	362	23.8
readout	3.9	0.9	0	0	0	0
configuration	10.0	2.3	0	0	0	0
subtotal TPC	243.1	57	1062	39	416	27
common	119.8	28	1252	46	0	0
total	362.9	87-100	2314	85	416	27

表 1: 各種モジュールの FPGA(Arria10 10AX115S3F45E2SG) リソース使用量

一方、360 台の FLP とそれらに搭載された FPGA ボード、さらには前段電子回路も含めた全てのデバイスの設定、動作中の不具合の発見や修正をすべて人の手で行うことは非現実的である。本研究ではこれらのデバイスを完全自動にて設定・監視するためのシステムとして DCS(Detector Control System)を平行して開発した。

本開発は、大山(代表)が統括し、長崎総合科学大の大学院生、ドイツ・ハイデルベルグ大の大学院生、ドイツ・フランクフルト大の研究者らとチームを結成して臨んだ。一方郡司(分担)は、CERN 現地における実機を用いたテストと、それに向けた TPC 検出器の準備を現地の研究者らと共に実施した。また、本研究は平行して ALICE の物理データ解析、ALICE 実験施設運用とデータ収集に深く関わりつつ遂行した。本研究中のこれらの貢献により、ALICE は多くの物理結果を生み出した。いくつかの FPGA アルゴリズムの評価には、ALICE が測定した物理データを反映させた検出器のシミュレーション結果を用いている。それらの結果を開発した FPGA アルゴリズムのパフォーマンスを確認するための論理シミュレーション(RTL Simulation)への入力として用いている。

4. 研究成果

2017 年度研究開始とともにチームを結成し、FPGA に実装すべき機能の詳細の策定、それらのモジュールへの切り分け、モジュール間インターフェースの定義を行った。始動したプロジェクトの概要・進捗状況を、電子情報通信学会にて報告を行った[4,5]。また、このような異種デバイスを用いた新たな計算技術の物理実験における応用を議論する場として、ワークショップを開催し、琉球大、長崎大、佐賀大、東京大、原子力研究開発機構らの研究者らと情報を交換した[6]。

今回 FPGA に搭載を試みた解析モジュールは、表 1 にまとめた通りである。*peripheral* は様々な小型モジュールの集合であり詳細説明は省略する。*GBT decoder* は GBT 経路でシリアル化されて送られてきたデータを解釈し、並列化する。*sorter* は、*GBT decoder* から受け取った 1600 チャンネルの ADC データを、正しい検出器のジオメトリに沿った順序に並べ替えるための巨大ソーティング・マトリクス(クロスバー・スイッチ)であり、FPGA 内臓メモリをデータ蓄積用と巨大ルックアップ・テーブルとして用いて実装した。*CMF* は Common Mode Filter である。GEM と読み出しパッド面は平行平板コンデンサを構成するため、ある読み出しパッドに大きなシグナルが生じると、GEM を通して全てのパッドにクロストークが誘起される。これはコモン・モード・ノイズとして全チャンネルに共通したノイズとして観測される。これを除去するのが *CMF* である。差動伝送回路のコモン・モード除去とは異なり、多数チャンネル同時処理型適用フィルタと言える。*clusterizer* は前章で述べた電子シグナルの発見とその特徴量化を行う。最後に *readout* は最終的に得られたデータを既定のフォーマットでパッキングし、PCI Express バスに送り出す。その他、*cnfiguration* および *common* は全モジュールに共通したサービス・ロジックである。例えばクロック生成、タイミング調整、管理バス等がこれに含まれる。2018 年度内には、これらの開発の初期バージョンの開発をほぼ完了し、本プロジェクトの概要・進捗状況を、日本物理学会にて報告した[7]。さらに、開発した全てのモジュールを一つのファームウェアに集約する作業を行い、*clusterizer* を除くほぼ全てのモジュールが Arria10 FPGA に搭載可能であることを確認した。この基本ファームウェアにて、CERN で実際の検出器前段電子回路からデータを受信することに成功した。

CMF は 1600 チャンネルの ADC 値を同時処理するが、初期の実装では ADC 各々についてシグナ

ルの有無を判別し、シグナルを持たない ADC のみの平均値を計算することでコモン・モード・ノイズ値を求めていた。しかしこの方式では粒子密度に比例して推定したコモン・モード・ノイズ値が大きくバイアスを受けることが判明した。そこで、全 ADC 値のヒストグラムを、サンプリング・レートである 5MHz と同頻度で随時作成しながら、毎回その中央値を求め、コモン・モード・ノイズの強度を推定するアルゴリズムを開発した。結果として、中央値を用いると初期実装より FPGA のリソースを多く消費するが、粒子密度によるバイアスが無視出来る 1 LSB 程度に収まることが分かった。

これらの開発に平行して、FPGA およびフロントエンドを制御するための DCS の開発も進め、前段電子回路の電源制御、各種設定をはじめとした基本的な制御に関し、CERN にて実機を用いた基本テストを完了した。

表 1 には、本開発で得られた各モジュールそれぞれの FPGA リソース使用量・使用率を掲載している。*CMF* の使用率に幅があるのは、上記にある二種類の実装があるためである。ALM (FPGA のリソースの単位) の使用率は、*clusterizer* を除くほぼ全てで 15% 以下となっており、メモリ (M20K) や演算装置 (DSP) の使用率も十分低く抑えられている。しかし一方、*clusterizer* は ALM 使用率が 40% 程度と極端に高い。*clusterizer* を含めると全 FPGA リソース使用率は 80% を超えてしまい、結果としてタイミング補償が破綻し目的の動作速度を実現出来ない事が判明した。解決法として、FLP ではなくその後段の処理系において実装する方向で計画を修正することとし、その実装手段として、GPU (Graphic Processing Unit) を用いる案と HBM (High Band-width Memory) 技術を用いた FPGA を用いる案を提唱し、検討を行った。これらの案の詳細な実装とテストは本研究課題終了後の新たなテーマとなった。

一方、*clusterizer* アルゴリズム以外の全てのアルゴリズムに関しては、1600 チャンネルの ADC データを Arria10 FPGA で処理することが十分現実的であることが実証されたといえる。2019 年 6 月には、これらの成果に関して国際シンポジウムにて講演した [8]。2020 年 3 月には、ワークショップを開催し、クラスタリングや、さらに複雑な解析アルゴリズムの FPGA 化の問題とその解決策、さらに本研究で開発した技術の将来計画における応用に関して、琉球大、筑波大、原子力研究開発機構の研究者らと議論した [9]。

<引用文献>

- [1] ALICE Collaboration, “Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC”, Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044.
- [2] ALICE Collaboration, “Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber” CERN-LHCC-2013-020/ALIDE-TDR-016, Mar. 3, 2014.
- [3] P. Morieria *et al.*, “The GBT Project”, Proceedings of the Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, pp. 342-346, DOI: 10.5170/CERN-2009-006.342
- [4] 荻野雅紀, 郡司卓, 大山健, 佐甲博之, 馬越, 中條達也, 竹内遥祐, “GPGPU・FPGA を用いた広帯域幅・分散型高エネルギー物理実験データ収集・処理システム”, 電子情報通信学会九州大会, 琉球大学, Sep. 26, 2017.
- [5] 竹内遥祐, 荻野雅紀, 大山健, 佐甲博之, 郡司卓, 中條達也, “FPGA を用いた大規模物理実験データ収集処理システム”, 電子情報通信学会九州大会, 琉球大学, Sep. 26, 2017.
- [6] 研究会 “異種デバイス高速結合型高密度情報処理システムの展望”, 長崎総合科学大学, Feb. 7, 2018, <https://indico.cern.ch/event/691936/>
- [7] 大山 健, “LHC Run3 に向けた高度化後 ALICE-TPC の連続読み出し型データ収集システム”, 日本物理学会, 九州大学, Mar. 14-17, 2019.
- [8] K. Oyama, “FPGA accelerated HPC for Experimental Physics”, HEART2019: International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies, Nagasaki, Jun. 6-7, 2019.
- [9] ミニワークショップ “次世代物理実験に向けた広帯域データ収集・処理システム”, 琉球大学田町オフィス (キャンパス・イノベーションセンター東京), Mar. 16, 2020, <https://indico.iist.nias.ac.jp/event/216/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 S. Acharya et al. (A Large Ion Collider Experiment Collaboration)	4. 巻 124
2. 論文標題 Scattering Studies with Low-Energy Kaon-Proton Femtoscopy in Proton-Proton Collisions at the LHC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 92301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.092301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 ALICE Collaboration	4. 巻 802
2. 論文標題 Evidence of rescattering effect in Pb-Pb collisions at the LHC through production of $K^*(892)^0$ and (1020) mesons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135225 ~ 135225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 ALICE Collaboration	4. 巻 802
2. 論文標題 Measurement of strange baryon-antibaryon interactions with femtoscopic correlations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135223 ~ 135223
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 ALICE Collaboration	4. 巻 800
2. 論文標題 Multiplicity dependence of light (anti-)nuclei production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135043 ~ 135043
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.135043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 ALICE Collaboration	4. 巻 797
2. 論文標題 Study of the π - π interaction with femtoscopy correlations in pp and p-Pb collisions at the LHC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 134822 ~ 134822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.134822	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 ALICE Collaboration	4. 巻 797
2. 論文標題 Λ^0 and $\bar{\Lambda}^0$ lifetime measurement in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV via two-body decay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 134905 ~ 134905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.134905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Acharya et al. (A Large Ion Collider Experiment Collaboration)	4. 巻 123
2. 論文標題 Investigations of Anisotropic Flow Using Multiparticle Azimuthal Correlations in pp, p-Pb, Xe-Xe, and Pb-Pb Collisions at the LHC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 142301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.142301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 ALICE Collaboration	4. 巻 793
2. 論文標題 Λ_c^+ production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 212 ~ 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.04.046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ken Oyama
2. 発表標題 FPGA accelerated HPC for Experimental Physics
3. 学会等名 HEART2019: International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大山 健
2. 発表標題 LHC Run3に向けた高度化後ALICE-TPCの連続読み出し型データ収集システム
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻野雅紀, 郡司卓, 大山健, 佐甲博之, 馬越, 中條達也, 竹内遥祐,
2. 発表標題 GPGPU・FPGAを用いた広帯域幅・分散型高エネルギー物理実験データ収集・処理システム
3. 学会等名 電子情報通信学会九州大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内遥祐, 荻野雅紀, 大山健, 佐甲博之, 郡司卓, 中條達也
2. 発表標題 FPGAを用いた大規模物理実験データ収集処理システム
3. 学会等名 電子情報通信学会九州大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ: LHC ALICE 実験 日本グループ <http://alice-j.org>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	郡司 卓 (Gunji Taku) (10451832)	東京大学・大学院理学系研究科・准教授 (12601)	
連携研究者	浜垣 秀樹 (Hamagasaki Hideki) (90114610)	長崎総合科学大学・新技術創成研究所・教授 (37301)	
連携研究者	杉立 徹 (Sugitate Toru) (80144806)	広島大学・大学院理学研究科・教授 (15401)	
連携研究者	田中 義人 (Tanaka Yoshito) (30269089)	長崎総合科学大学・大学院工学研究科・教授 (37301)	