

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01905

研究課題名（和文）LHC・ATLASカロリメータの新トリガー読み出しのシステム構築と動作検証

研究課題名（英文）System R&D and commissioning of new trigger readout for LHC ATLAS calorimeters

研究代表者

田中 純一（Tanaka, Junichi）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号：80376699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：LHC・ATLAS実験の電磁カロリメータグループは、トリガーのための新しい読み出しシステムを開発し、2021年9月に実験装置へのインストールを完了した。本システムは約34000チャンネルを持ち、高性能なFPGAを用いて固定レイテンシ125nsでエネルギーと時間情報をトリガーに提供する。FPGAファームウェアを完成させるとともに、その設定値を更正データから決定した。実運用に向け動作確認用のモニターツールの開発も行った。さまざまな検証を行い、総チャンネルのうち99.3%が実用可能であることを示した。2023年の実験からは本システムによるトリガーで実際のデータ取得が行われる予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界最高エネルギーであるLHC加速器を用いたATLAS実験では、LHCの高性能化に向けて、検出器のアップグレード研究が必要不可欠である。本システムはその一つで、提案から10年以上を経て完成した。本研究はこの長いR&Dの総仕上げで、システムのインストールからそのコミッショニングまでを行う研究を実施した。2022年7月からは陽子・陽子衝突の実験の実験においてテスト運用することに成功した。実験データ、更正データ、シミュレーションデータを用いて動作検証等を進め、2023年度からは本システムが使われる。従来のトリガーでは取得できなかったデータの取得が可能になり、素粒子物理学の発展に向けて貢献できる。

研究成果の概要（英文）：A new trigger readout system for the electromagnetic calorimeter of the LHC-ATLAS experiment has been completed, and the installation has been also completed in September 2021. This system has about 34000 channels and uses a high-performance FPGA to provide energy and timing information with a fixed latency of 125ns for triggering. The FPGA Firmware R&D was completed, and its configuration values were properly given. We also developed monitor tools for operation. We performed many verification works and showed that 99.3% of the total channels were ready for data taking. From 2023, this new digital readout for trigger will be used for actual data acquisition.

研究分野：Experimental Particle Physics

キーワード：Trigger Readout electronics FPGA firmware Calorimeter ATLAS LHC

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スイス・ジュネーブ郊外にある CERN 研究所の世界最高エネルギーの大型ハドロンコライダー(LHC)は標準理論を超える物理の発見を目指し高性能化・高輝度化する。そのデータを受ける ATLAS 実験の検出器のアップグレードも必要不可欠である。本研究の対象である電磁カロリメータの読み出しエレクトロニクスのアップグレードは 10 年以上前に提案され、我々も 2013 年 3 月から正式なメンバーとして R&D に参加した。我々の研究チームはリアルタイム信号処理アルゴリズムを行うための FPGA ファームウェア開発とともに、CERN 研究所において本システムのインストレーションからコミッショニングまで行う計画であった。2018 年に前実験期間 (Run2) が終了し、本システムのインストールが 2019 年度から、Run3 実験が 2021 年度より開始される予定であった。しかしながら、新型コロナウイルス感染症のため 1 年ほど ATLAS 実験全体が遅れた。2022 年度に Run3 実験が開始された。

2. 研究の目的

我々の研究チームは 2013 年 3 月から ATLAS 検出器の電磁カロリメータグループに参加し、読み出しエレクトロニクスのアップグレード計画を進めてきた。この新しい読み出し回路は ATLAS 実験が終了する 2040 年ごろまで使用される予定であり、これからの ATLAS 実験成功の重要な鍵である。

トリガーのための読み出し数を従来と比較して 10 倍細分化することで電磁シャワーとハドロンシャワーが識別可能にする。このトリガー読み出しの最小単位を Super Cell と呼ぶ。この計画の中で、我々の研究チームは FPGA 上で動作する Super Cell のためのリアルタイム信号処理アルゴリズムの研究開発を行ってきた。具体的には Super Cell に入ってきた信号のエネルギーと時間(タイミング)を算出するファームウェアを開発した。

本研究の目的は 2019 年より始まるカロリメータの読み出しエレクトロニクスのハードウェアのインストール作業を成功させるとともに、ファームウェア開発を完成し、コミッショニングを完遂することである。再開される実験 (Run3 実験) において、本システムを使ったトリガーでデータ取得を行う。

3. 研究の方法

本研究では、読み出し回路システムのハードウェアのインストールとコミッショニングを行い、そして FPGA ファームウェアを実験の実験で利用できるように完成させる。

ハードウェアのインストール作業は江成が大学院生を率いて CERN において、CERN やフランスのグループと協力しながら遂行する。作業(下図)はフロントエンドとバックエンドに分けられるが、我々のグループは前者を中心に行う。トリガー読み出し経路を新設するが、これには、既存の読み出しを変更し、新しい回路システムを入れ込む必要がある。この更新作業は、フロントエンド・クレートのベースプレーンの入れ替え、メイン読み出しモジュールであるフロントエンド・ボードのメザニカード (LSB) の入れ替え、そして新設トリガー読み出しデジタルイザード (LTDB) のインストールである。これは ATLAS 検出器本体に搭載されたクレート内の更新のため、他の検出器を含め ATLAS 実験全体のアップグレードスケジュールにしたがいながら着実に進める。インストール作業では、各チャンネルが正しく接続されているか、ノイズは増えていないか、出力信号の線形性に問題は無いかということを確認しながら進める必要がある。こ

このための管理、運用、そしてデータ解析システムの構築も行う。また、インストール後のコミッショニングでは、すべての Super Cell の動作確認を行い、さらに正しいエネルギーと時間が得られるようにアルゴリズムに使われているパラメータを調整する。最終的には、今回更新したトリガー用の読み出し (Super Cell) と物理解析用のメイン

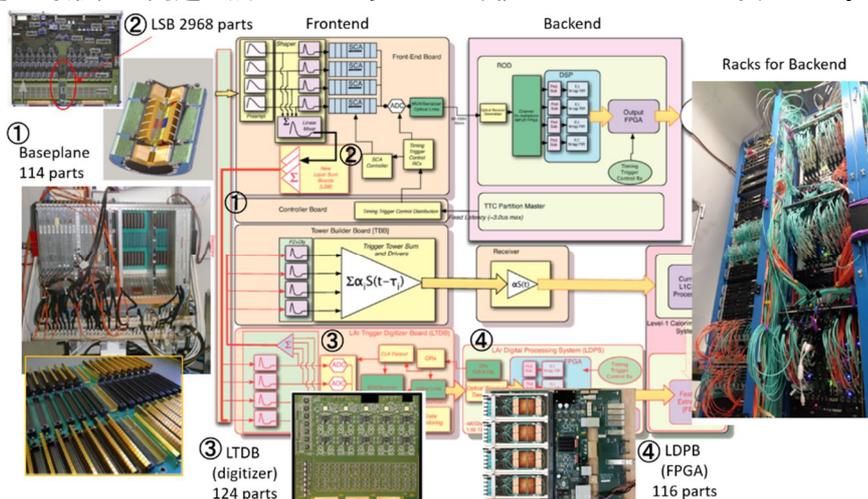


図: アップグレード部分 フロントエンド(), バックエンド()

出力(物理解析用のより細かい読み出しで、これはアップグレードしなかったため、動作や性能は保障されている)の比較を、衝突データを用いて行う。

FPGA ファームウェアの開発は田中が大学院生を率いて CERN と東京で行う。我々のグループはフランスのエンジニアの協力のもとで 125ns の固定レイテンシでカロリメータのエネルギーを計算するファームウェアの開発を行ってきた。このファームウェアは前ページ図の の FPGA で動作する。加速器が作る陽子ビームのバンチ構造のため、カロリメータで観測されるベースラインはバンチの位置によって変動する。この変動に対応するアルゴリズムを導入するとファームウェアでタイミングエラーが起こる問題が認識されており、本研究ではこの問題をフランス・CERN のエンジニアの協力のもと回避する手法を開発する。また、ファームウェアに実装しているオプティマルフィルターの詳細な動作確認のため、アナログ信号の波形影響やパイルアップ効果などを適切に評価するためのシミュレーター(PLISM)を開発し、アルゴリズムの特性、信号サチュレーションの効果等を検証する。更正データで得られた波形等も入力可能であるこのシミュレータフレームワークは、コミショニングにも利用する。

4. 研究成果

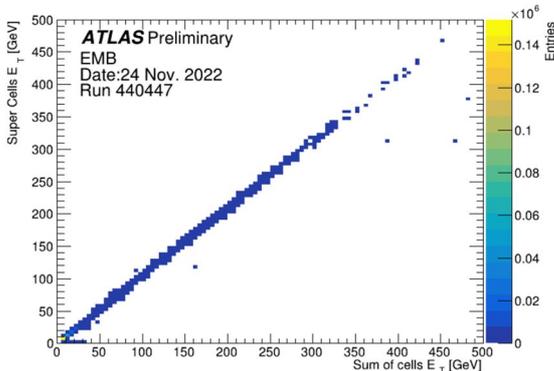
新しいデジタルトリガー読み出しシステム(約 34000 チャンネル)のインストールは 2019 年度から開始した。2020 年 2 月ごろまでは CERN の現場に大学院生も中長期に滞在し作業を行った。しかし、その後は新型コロナウイルス感染症の影響のため、2020 年度からは実質、我々のグループからは江成のみが CERN でインストール作業を進めた。また、モジュール基板などの不具合も発生したが、コロナのため、納期等に大きな遅れが生じることもあった。結果的に ATLAS 実験全体が 1 年ほど遅れ、我々のインストール作業は 2021 年 9 月に完了した。江成はこれらの実績が高く評価され、ATLAS 実験の Outstanding Achievement 賞(2022 年 6 月、右写真)を受賞した。



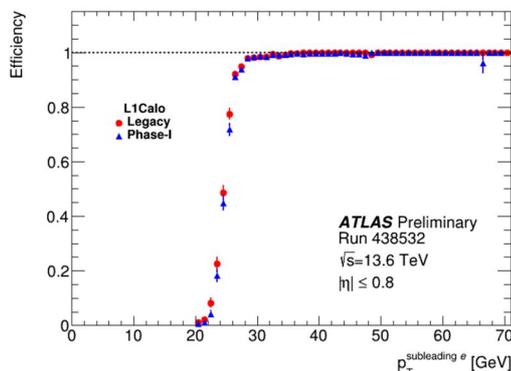
For outstanding contributions to the ATLAS Liquid Argon Calorimeter Digital Trigger System: **Georges Aad** (Aix-Marseille Université), **Fatih Bellachia** (Université Savoie Mont Blanc), **Nicolas Chevillot** (Université Savoie Mont Blanc), **Yuji Enari** (University of Tokyo), **Sylvain Lafrasse** (Université Savoie Mont Blanc), **Stefan Simion** (Université Paris-Saclay)

インストール後、宇宙線、Calibration システムのデータ、2021 年 10 月、2022 年 4 月の実パイロットラン(Beam Splash)、2022 年 5 月の 900GeV の陽子・陽子データ、そして、2022 年 7 月から 11 月までの 13.6TeV の陽子・陽子データと様々なデータを用いてこのシステムの動作検証を実施した。光ファイバー接続等を逐次確認するためのモニターツールなども開発した。

本システムは固定レイテンシ(125ns)でエネルギーと時間情報(タイミング)を正しく発行(算出)する必要があり、上述したようにオプティマルフィルターという手法を使ってエネルギーとタイミングを算出する。このフィルターに必要な設定パラメータを、PLISM フレームワークを用いて Calibration データから決定した。たとえば、タイミングはバンチレベルの 0(25ns)の調整からスタートし、最終的にはパラメータの Phase 調節によって 0(1ns)のレベルで調整することに成功した。また、物理解析用のメイン出力と比較することでエネルギーが適切に算出できることも確認した(左下図)。このような検証を経て、約 34000 チャンネルのうち 99.3%が実用可能であることを示した。エネルギーとタイミングを計算する FPGA ファームウェア開発において、より適切にベースラインを更新する仕組みを導入することに成功した。2023 年の実験からはこの新しいデジタルトリガー(右下図)が実際のデータ取得に使われる予定である。



横軸：物理解析用のメイン出力
縦軸：今回の更新した読み出し出力



電子の横運動量に対するトリガー効率
赤：従来のトリガー
青：更新した読み出しを用いたトリガー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tateno G.	4. 巻 15
2. 論文標題 LHC-ATLAS Phase-I upgrade: calibration and simulation of a new trigger readout system for the Liquid Argon calorimeter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C05060 ~ C05060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/05/C05060	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 -

1. 著者名 Oishi R.	4. 巻 15
2. 論文標題 LHC-ATLAS Phase-1 upgrade: firmware validation for real time digital processing for new trigger readout system of the Liquid Argon calorimeter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C05013 ~ C05013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/05/C05013	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 -

1. 著者名 Aad G. et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 The Phase-I trigger readout electronics upgrade of the ATLAS Liquid Argon calorimeters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P05024 ~ P05024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/05/P05024	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 Zhang Tingyu	4. 巻 1047
2. 論文標題 ATLAS LAr Calorimeter Commissioning for LHC Run-3	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167820 ~ 167820
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.167820	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 -

1. 著者名 Zang J.	4. 巻 18
2. 論文標題 ATLAS LAr calorimeter commissioning for LHC Run-3	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01045 ~ C01045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/01/C01045	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 -

[学会発表] 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Zhang Tingyu
2. 発表標題 ATLAS LAr Calorimeter Commissioning for LHC Run-3
3. 学会等名 15th Pisa Meeting on Advanced Detectors (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zang Jiaqi
2. 発表標題 ATLAS LAr Calorimeter Commissioning for LHC Run-3
3. 学会等名 Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zang Jiaqi
2. 発表標題 ATLAS LAr Calorimeter trigger upgrade: Commissioning with the proton-proton pilot run and readiness for the coming Run 3 experiment
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川 真林
2. 発表標題 ATLAS LAr カロリメータ Phase-Iアップグレード：新トリガー読み出しシステムにおけるフィルタリング手法の最適化の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhang Tingyu
2. 発表標題 ATLAS LAr Calorimeter Run3 experiment: Commissioning on the new digital trigger readout
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川 真林
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメータRun3実験：新トリガー読み出しシステムのコミッショニングと実データを用いた稼働状況の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江成 祐二
2. 発表標題 ATLAS LAr カロリメータ Run3 実験：デジタルトリガー読み出しシステムのコミッショニング運用のまとめ
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古川 真林
2. 発表標題 ATLAS LAr カロリメータ Run3 実験：デジタルトリガー読み出しシステムの2023年に向けた課題と実現性
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 舘野元
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメータPhase-Iアップグレード：高輝度環境におけるトリガー用エネルギー再構成のための較正
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保龍之介
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメータPhase-Iアップグレード：高速シミュレーターPLISMによるトリガー読み出し用フィルタリングアルゴリズムの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲間聖
2. 発表標題 ATLAS 液体アルゴンカロリメータ運用に向けたパルス自動異常検知システムの開発
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zang Jiaqi
2. 発表標題 Commissioning of ATLAS LAr Calorimeter trigger upgrade: Installation status and Connectivity check
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zang Jiaqi
2. 発表標題 ATLAS LAr Calorimeter trigger upgrade: Commissioning status and preparation towards proton-proton pilot run at 13 TeV.
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 張庭宇
2. 発表標題 ATLAS LAr Calorimeter upgrade: Saturation pulse detection on new digital trigger readout
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川真林
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメータPhase- アップグレード：長寿命で重い粒子のためのトリガーの研究
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 館野元
2. 発表標題 ATLAS LAr カロリメータアップグレード：高輝度環境におけるエネルギー再構成のための新エレクトロニクスのキャリブレーション
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石玲誉
2. 発表標題 LHC-ATLAS RUN3実験に向けたLATOMEファームウェアの検証とベースラインの補正機構の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 館野元
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメータアップグレード：高輝度環境におけるエネルギー再構成のための新エレクトロニクスのキャリブレーション
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石玲誉
2. 発表標題 ATLAS LArカロリメーター トリガーアップグレード：実機を用いたエネルギー計算機構の検証
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gen Tateno
2. 発表標題 LHC-ATLAS Phase-I upgrade: calibration and simulation of a new trigger readout system for the Liquid Argon calorimeter
3. 学会等名 Calorimetry for High Energy Frontier 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Reiyo Oishi
2. 発表標題 LHC-ATLAS Phase-1 upgrade: firmware validation for real time digital processing for new trigger readout system of the Liquid Argon calorimeter
3. 学会等名 Calorimetry for High Energy Frontier 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ATLAS Outstanding Achievement Award 2022 http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/information/20220624.html 本研究課題に関連して、江成助教は「ATLAS Outstanding Achievement Award 2022」を受賞し、液体アルゴンカロリメータ検出器アップグレードでの貢献が称えられました。</p>
--

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	江成 祐二 (Enari Yuji) (60377968)	東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------