

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13808

研究課題名（和文）J-PARC重イオン衝突における究極的高速データ収集系への挑戦

研究課題名（英文）Challenge of ultimate fast data acquisition system for heavy-ion collisions at J-PARC

研究代表者

佐甲 博之（Sako, Hiroyuki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：40282298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：J-PARCにおける重イオン衝突で超高密度物質を生成し、QCD相構造の探索を行うJ-PARC重イオン計画を検討している。この実験で生成されるデータレートは1TB/sに達し、高速データ収集技術が実験の成否を決める。このために有力と考えられている技術がトリガーレスデータ収集系とソフトウェアトリガーである。本研究ではトリガーレスデータ収集系の中で重要なFPGA内での検出器データ圧縮法の開発を中心に、データ収集サーバ試験機を構築し、性能評価の試験を行った。さらに、J-PARC重イオン計画において重イオン衝突実験検出器の概念設計を進め、ソフトウェアトリガーとして有力な物理量の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来計画を検討しているJ-PARCにおける重イオン衝突実験ではかつてない1TB/sのデータレートが見込まれ、そのデータ量をオンラインで処理することが非常に重要である。本研究はそのためのオンラインデータ処理技術と、重イオン衝突で生成される様々な粒子を用いたインテリジェントな事象選択方法が必要となり、本研究はそのような技術の基礎開発を行うものである。本研究の成果としては、オンラインデータ処理のうち、検出器からの波形データのデータ圧縮技術を開発し、また、事象選択方法についてはシミュレーションによる研究によって、有力な選択方式を開発した。

研究成果の概要（英文）：We are planning J-PARC Heavy-ion Project, where we create extremely high-density matter in heavy-ion collisions at J-PARC and search for QCD phase structures. In this experiment, the data rate will reach 1 TB/s, and a fast data acquisition (DAQ) system is indispensable. For the DAQ system, the most important technique is a trigger-less readout system, and software triggers. In this research project, we developed mainly data compression methods in FPGA, and developed a prototype DAQ server. We also developed conceptual design of detectors for J-PARC Heavy-ion Project, and considered observables for software triggered.

研究分野：原子核物理学

キーワード：J-PARC データ収集系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

J-PARC における重イオン衝突で中性子星中心部の密度に匹敵する超高密度物質を生成し、QCD 相構造の探索を行う J-PARC 重イオン計画を検討している。J-PARC の重イオン衝突で史上最高の事象レート  $10^7$  Hz を実現する見通しであるが、この実験で生成される全検出器の信号は、高エネルギー実験及び原子核実験において史上最高規模のデータレート 1.2TB/s に達し、超高速データ収集技術開発が実験の成否を決める。このために有力と考えられている技術がトリガーレスデータ読み出しとソフトウェアトリガーであり、それらによってデータレートを数 10GB/s 程度に抑えることが重要である。本計画ではこれらの研究を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記のトリガーレスデータ読み出しとソフトウェアトリガーに関連する基礎的な技術開発を行うとともに、J-PARC 重イオン計画に関する検出器の設計を進展させる。このため LHC-ALICE 重イオン衝突実験の高速データ収集系を参考とし、データ収集系試験機を構築し、データ転送等の性能評価試験を行う。一方、1TB/s が予想される J-PARC 重イオン計画におけるソフトウェアトリガーを視野に入れた検出器設計及び粒子シミュレーションを行う。

### 3. 研究の方法

本研究ではソフトウェアトリガーとトリガーレスデータ収集系に関する設計開発と性能評価を行う。ソフトウェアトリガーに関しては、J-PARC 重イオン衝突のシミュレーションによって、事象構築と高バリオン数事象等を選択するトリガーのアルゴリズムを開発する。トリガーレスデータ収集系に関しては、ALICE 実験のトリガーレスデータ収集系を基礎とした試験機を設計・製作し、性能試験を行う。また、トリガーレスデータ収集系のうち、フロントエンド回路からの波形信号のゼロサプレッション、ヒットのクラスタリング等によるデータ圧縮技術の開発を行う。

### 4. 研究成果

LHC-ALICE 実験は、J-PARC 重イオン計画とほぼ同程度の 1TB/s の高速データを読み出しベースライン較正、ヒットのクラスタリング、オンライントラッキング等を FPGA、GPU を駆使して高速で行い、50GB/s 程度までデータレートを減らすデータ収集システムを開発している。そこで我々は ALICE 実験のデータ収集系をベースとしたデータ収集試験機の構築することにした。

H28 年度は、J-PARC のチャームバリオン分光実験 (E50) と J-PARC 重イオン計画研究者 (阪大、KEK、理研) を取りまとめて、ALICE 実験へ準共同研究メンバーとして参入した。さらに長崎総合科学大、東大 CNS、筑波大と連携して、ALICE データ収集系のサーバをベースとしてデータ収集系サーバを構築した。図 1 に J-PARC 重イオン計画における高速データ収集系の設計概念図と、本研究におけるデータ収集サーバ試験機を示す。

H29 年度は、重イオン衝突による高密度物質の生成事象の選択方法を確立するため、理論モデル (JAM) によるシミュレーション研究を行い、様々な観測量と密度の関係を調べた。その結果、全荷電粒子の横運動量の和が高密度物質が生成された事象の選択に適していることを見出し、これをソフトウェアトリガーとして採用することにした。さらに、J-PARC 重イオン計画における重イオン衝突実験スペクトロメーターの設計を進め、ダイポール磁石とシリコンピクセル検出器、タイムプロジェクションチェンバー等を用いた大立体角スペクトロメーターを設計した (図 2)。さらに、そのための粒子シミュレーションコードを開発し、立体角、粒子識別、運動量分解能等のスペクトロメーターの性能評価を行った。これによってソフトウェアトリガーアルゴリズムの基礎となるシミュレーション・飛跡解析コードを開発することができた。

一方、高速データ収集サーバに関しては、長崎総合科学大と共同でデータ収集試験の整備を行った。ALICE 実験のデータ収集・信号処理 FPGA ボード (C-RORC) をサーバに設置して、データ収集ソフトウェアを整備し、メモリ上のデータを使用して、高速データバス (PCIe) を介したメモリと C-RORC 間的高速読み出しの試験に成功した。

H30 年度は ALICE 実験の TPC 検出器におけるデータ収集 FPGA ボード (CRU) における FPGA 上のゼロサプレッション、コモンモードノイズ除去、クラスタリング等のデータ処理を行う基本ロジックのファームウェア開発をほぼ完成させ、さらに CERN において CRU 実機におけるデータ読み出し試験にも成功した。

CRU のハードウェアに関しては H30 年夏に生産を完了し、本研究用に 1 台入手できる予定であったが、電源ライン回路に不具合が発生し、その対策のために、完成時期が R1 年度に遅れることとなった。これにより、H30 年度に予定していた CRU を用いたデータ収集系の実用化に向けた試験を R1 年度に変更する必要が発生した。

J-PARC 重イオン計画における重イオン衝突実験スペクトロメーターの設計と性能評価をさらに進め、昨年度に基本設計を行った超伝導ダイポール磁石、シリコンピクセル検出器、タイムプロ

ジェクションチェンバー、ミュオン飛跡検出器等から構成される大立体角スペクトロメータの詳細設計を行い、TPC のエネルギー損失と飛行時間測定による荷電粒子の識別性能、フロー測定のための事象平面分解能の評価、ダイミュオン測定用セットアップにおけるミュオン対の不変質量分布をシミュレーションによって評価した。

R1 年度は、ALICE 実験の CRU の TPC 検出器用の FPGA ファームウェア開発をさらに進め、ヒットデータのソーティング、ペDESTALの差し引きとゼロ抑制、コモンモードノイズのフィルタリング、TPC パッドヒットのクラスタリングのアルゴリズム等を実装した。しかし、クラスタリングに関しては、CRU の FPGA (Arria10) におけるロジックリソースの約 40% を消費することがわかり、ALICE のオンライン処理からは外さざるを得ないことがわかった。そこで、ALICE では CRU に代わってクラスタリング処理を行うデバイスとして、GPU の検討を行っているが、本研究では、CRU よりも高速なメモリ間のデータ転送が可能な、HBM (high band-width memory) を備えた FPGA ボード (Xilinx Alveo U50) によるクラスタリングの検討を行った。そのため、このボードを 3 台購入し、HLS (High-Level Syntheses) を用いてクラスタリングロジックを実装した。

本研究課題の締めくくりとして R2 年 3 月 16 日に研究会「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」(<https://indico.iist.nias.ac.jp/event/216/>) を行った。そこで、本研究で開発した ALICE CRU における FPGA によるデータ圧縮処理技術、新しい FPGA による CRU よりも高速なデータ処理の可能性、さらにこの技術の応用が期待される ALICE 実験の FoCal 計画と J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI) におけるオンラインデータ解析の計画について議論を行った。

以上のようにトリガーレスデータ収集系の中で、特に重要な FPGA 内でのクラスタリング、ゼロサプレッション等、検出データ圧縮の方法の開発を中心に行った。また、データ収集サーバ試験機を構築し、性能評価の試験を行った。一方、J-PARC 重イオン計画においてトリガーレスデータ収集系を用いる重イオン衝突実験における検出器の概念設計を進め、ソフトウェアトリガーとして有力な物理量の選択方法の検討を行った。さらに将来的に J-PARC 重イオン計画で有力と思われる HBM (high band-width memory) を持った FPGA ボードにおける試験を行った。

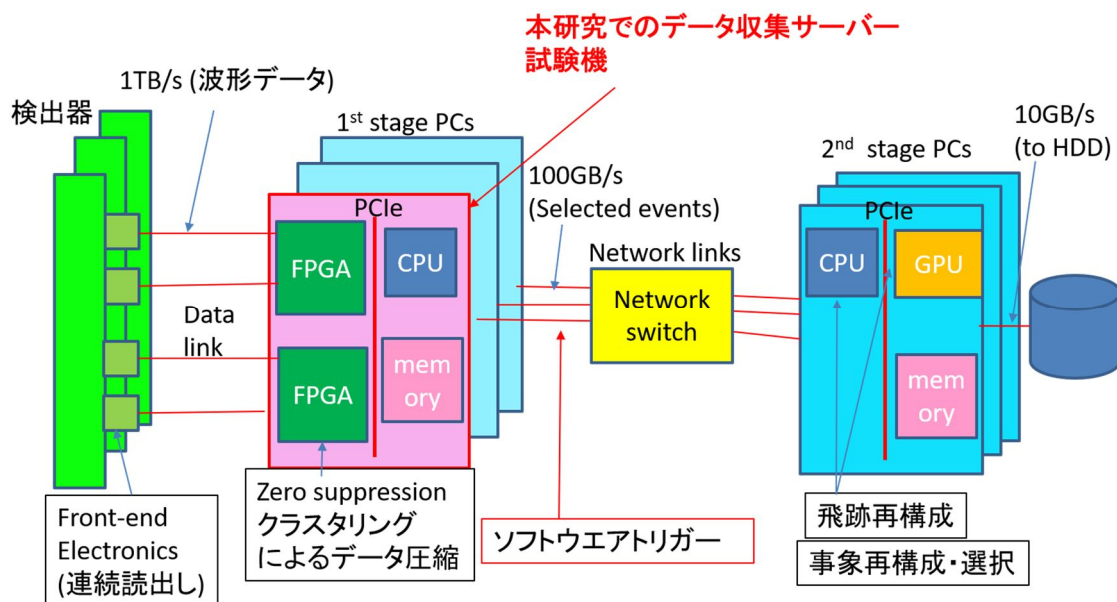


図 1: J-PARC 重イオン計画におけるデータ収集系全体の概念設計図。本研究でのデータ収集サーバ試験機は「1st stage PC」に相当する。

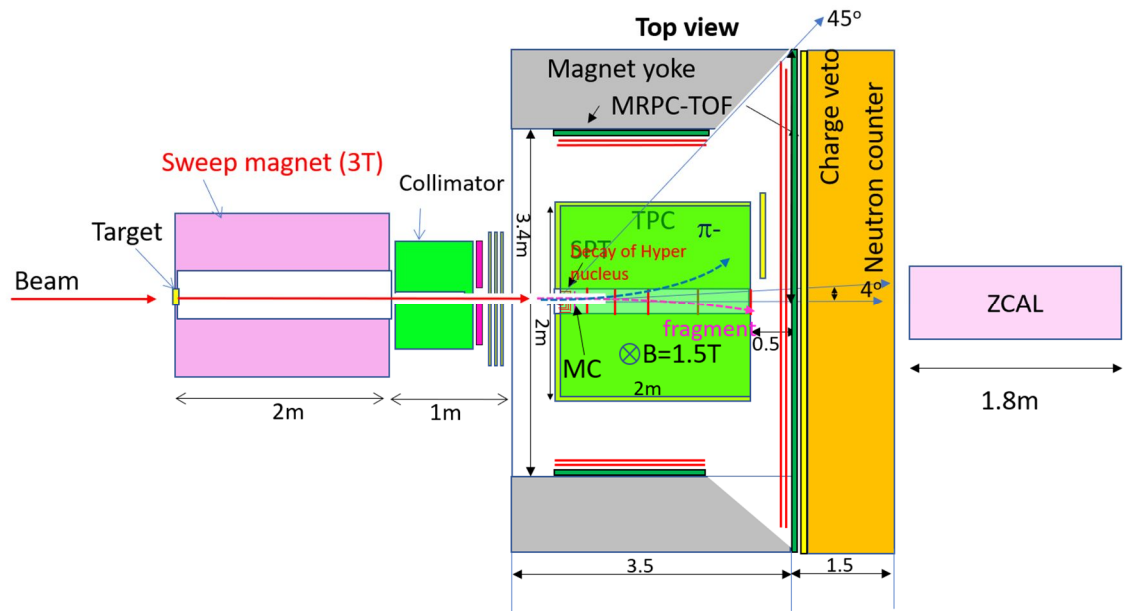


図 2 : J-PARC 重イオン計画の検出器の概念設計図。

## 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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroyuki Sako	4. 巻 982
2. 論文標題 Studies of extremely dense matter in heavy-ion collisions at J-PARC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 959 ~ 962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.11.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Sako	4. 巻 20
2. 論文標題 Studies of the QCD Phase Diagram with Heavy-Ion Collisions at J-PARC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 11051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.20.011051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Sako	4. 巻 2017
2. 論文標題 Prospect of heavy-ion collision experiments at J-PARC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 CPOD	6. 最初と最後の頁 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.311.0028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Sako	4. 巻 20
2. 論文標題 Studies of the QCD Phase Diagram with Heavy-Ion Collisions at J-PARC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.20.011051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Sako	4. 巻 CPOD2017
2. 論文標題 Prospect of Heavy-ion Collision Experiments at J-PARC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 9件)

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 Hiroyuki Sako
2. 発表標題 Study of high-density baryonic matter at J-PARC
3. 学会等名 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP2018), Huizhou, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Sako
2. 発表標題 Studying extremely dense matter at J-PARC-Heavy-Ion Program (J-PARC-HI)
3. 学会等名 The 2018 Korean Physical Society fall meeting, Changwon, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Sako
2. 発表標題 J-PARC Heavy-Ion Program
3. 学会等名 the 52nd Reimei Workshop “ Experimental and Theoretical Hadron Physics: Recent Exciting Developments ”, Tokai, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Oyama
2. 発表標題 CRU for FoCaL
3. 学会等名 International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Sako
2. 発表標題 Prospect of Heavy-ion Collision Experiments at J-PARC
3. 学会等名 CPOD2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Sako
2. 発表標題 Exploring dense matter with heavy-ion collisions at J-PARC
3. 学会等名 International workshop on the project for the extended hadron experimental facility of J-PARC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐甲博之
2. 発表標題 J-PARC-HIの現状
3. 学会等名 J-PARCエネルギー領域重イオン衝突のダイナミクス(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐甲博之
2. 発表標題 Current status of J-PARC
3. 学会等名 2017年度 KEK 理論センター J-PARC 分室活動 総括研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐甲博之
2. 発表標題 超高レートJ-PARC重イオン衝突実験におけるデータ収集の問題
3. 学会等名 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(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐甲博之
2. 発表標題 Studies of QCD phase diagram with heavy-ion collisions at J-PARC
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2017(国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 H. Sako
2. 発表標題 J-PARC Heavy-Ion Program Overview
3. 学会等名 Reimei Workshop "Physics of Heavy-Ion Collisions at J-PARC" (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Sako
2. 発表標題 Exploring QCD phase structures with heavy-ion beams at J-PARC - A future project at J-PARC -
3. 学会等名 J-PARC workshop 2016: From hadrons to QGP (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	大山 健  (Oyama Ken)  (10749047)	長崎総合科学大学・工学研究科・教授   (37301)	