

世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器 LHC を用いた ATLAS 実験は、2018 年までの 4 年間の第二期運転 (Run 2) で積分ルミノシティ 149 fb⁻¹ を記録した後、2022 年から開始予定の第三期実験 (Run 3) の準備のための長期シャットダウン中である。ATLAS 実験は、これまでの活動報告でも示されたように、第一期実験 (Run 1) と Run 2 までに取得したデータを用いて新粒子直接探索、ヒッグス粒子などの標準模型の精密測定による新物理探索など、多種多様な物理解析の結果を継続的に発表し、遂に千を超える学術論文を公表した。物理解析に加え、Run 3 に向けた LHC 加速器、ATLAS 検出器の双方の改良が進んでいる。さらには、2027 年から開始予定の高輝度 LHC (High-Luminosity LHC; HL-LHC) では、一桁上の陽子陽子衝突頻度によりさらに感度の高い新物理探索が期待されるが、同時に一桁増加するパイルアップ (1 回の陽子ビーム交差中に複数の陽子散乱事象が起こること、HL-LHC では 200 程起こると予想される) に対応するための一桁上の微細化、高速化、高放射線耐性強化を施した ATLAS 検出器とエレクトロニクスへの刷新に向けた開発と量産準備も進められている。

Run 3 開始に向けた準備

KEK ATLAS グループは、内部飛跡検出器のシリコンピクセル検出器、高運動量ミュオンを含む事象を選別するエンドキャップ部の高速エレクトロニクスを用いた初段ミュオントリガー、ソフトウェアによる詳細のデータ解析から興味ある物理事象を選別するハイレベルトリガーの開発・運用を主導している。

Run 3 開始前に行われる最も大掛かりな検出器アップグレードは、エンドキャップ部のトロイド磁場よりも衝突点側に設置される内部ミュオン検出器の刷新である。この検出器は、Micromegas 検出器と small-strip Thin Gap Chamber (sTGC) からなり、これらをまとめて New Small Wheel (NSW) と呼んでいる (図 1)。片側のエンドキャップ部の NSW が完成し、ATLAS 実験ホールにインストールされた。もう片側の NSW の建設も進んでおり、今年の終わりに ATLAS 実験ホールにインストールされる。このインストールに伴い、KEK ATLAS グループが主導する初段エンドキャップミュオントリガーもエレクトロニクスを刷新した。新型コロナウイルス感染拡大のために海外渡航が制限される前にエレクトロニクスのインストールや、これまでも動いていたシステムとの接続は完了しており、KEK のリモートサイトからオンラインで検出器との接続試験を進めてきた。Run 3



図 1: NSW 検出器。手前が完成したもので現在は ATLAS 実験ホールにある。後方に現在作製中のももの見える。

の開始を間近にひかえ、人数を最小に制限しつつも KEK、東大、神戸大、名古屋大などの研究者が CERN における研究を再開し、Run 3 から導入される新しいシステムとの接続試験などのコミッションングを進めている。

高度な事象分別を行うハイレベルトリガーは、上述の NSW だけでなくカロリメータのエレクトロニクスなどの、Run 3 から新しく導入される検出器やエレクトロニクスを利用したトリガーの開発を進めた。さらには、Run 3 のデータ解析を見据えたトリガーマニューアの構築を進めた。最近特に注目されている長寿命重粒子が LHC で生成された場合でもトリガーしてデータ収集ができるように、消失トラックトリガー、 dE/dx トリガー、Displaced vertexトリガーなどのアルゴリズムを開発し、この新しいアルゴリズムをトリガーマニューアに導入する準備を進めた。

ピクセル検出器は、このシャットダウン中にハードウェアとソフトウェアの改良に取り組んできた。ハードウェアについては、Run 2 の終了時点で故障によってピクセル検出器の 2~4 層目のモジュールの内、5.1%が読み出せなくなっていた。検出器からの電気信号を光信号に変換するためのオプトボードを 2021 年に交換し、読み出せないモジュールを 3.5%に低減できた。ソフトウェアについては、使用しているメモリの効率化を図り、Run 3 で導入されるデータ処理の並列化(マルチスレッド)へ対応できるように改修した。また、検出器の較正情報などを記録しておくデータベースの簡素化にも取り組み、データ容量を 1/10 に圧縮することに成功した。さらに、ピクセル・センサーの放射線損傷をシミュレートするプログラムを開発し、実装した。これにより Run 3 では、より実際の検出器応答に近いシミュレーションを用いて実験データとの比較ができるようになる。

HL-LHC に向けて

HL-LHC の膨大なパイルアップ環境において、低運動量の QCD 事象だけで構成されるような事象を排除することでトリガー頻度を抑えながら、私たちにとって興味ある物理事象のデータを確実に収集する必要がある。KEK が開発の中心となっているエンドキャップ部の初段ミューオントリガーでも、近年発達が目覚ましい高速通信技術や最先端の FPGA を活用して、MHz を超える高い事象頻度にも耐えうるデータ収集系と高運動量ミューオンの存在する事象を効率よく選別するミューオントリガーの開発を進めている。そのために、主に 3 種類のエレクトロニクスの開発を進めてきた。どの陽子陽子衝突から派生したミューオンか同定する ASIC、エンドキャップ部のミューオン検出器である Thin Gap Chamber (TGC) から来る 256 チャンネルのヒット情報を 16 ギガビット毎秒で転送する FPGA と 2 対の光トランシーバなどを搭載した PS ボードと、放射線環境下に曝される PS ボードに搭載される FPGA を監視・制御する JATHub ボードの試作 2 号機が完成し、動作検証試験と実験グループ内レビューを経て、初期量産開始の許可が出た(図 2)。また、10 ギガビット毎秒のデータ通信を可能にする光トランシーバ 120 対と大規模 FPGA を搭載することで、30 枚の PS ボードから来る TGC ヒット情報を取りまとめてミューオン飛跡の再構成を行う後段トリガープロセッサボードの試作機的设计が終了した。この試作機の動作検証が今後進められる。さらには、この後段トリガープロセッサボード状の FPGA に組み込むミューオントリガーファームウェアの開発も東京大学、名古屋大学、京都大学と共同で進められた。



図 2：PS ボード（左）と JATHub ボード（右）。

HL-LHC の膨大なパイルアップ環境下においても荷電粒子の飛跡を精密に再構成するために、内部飛跡検出器は、大面積で高精細なシリコン検出器に入れ替える。シリコン検出器は、ストリップ検出器とピクセル検出器に分かれるが、ストリップ長、ピクセルサイズともにこれまでのものよりも小さく、その上、大面積をカバーするため読出し数も一桁以上増え、さらに高放射線耐性も兼ね備えなければならない。これまで、KEK ATLAS グループはストリップとピクセルの両方の開発を主導してきたが、双方とも開発から量産へのフェーズに移り始めている。ストリップ検出器は、初期量産品に対して IV 測定やたわみ検査などの観点から量産開始が認められ、日本が担当する 3,000 モジュールの量産を開始した。ピクセル検出器は、センサー、読出し ASIC、フレキシブル基盤を冷却台上に載せたモジュールを 2,000 個ほど量産予定であるが、その初期量産に向けた製作、動作検査、温度サイクル(図 3)などの過程の最終調整を急ピッチで進めている。

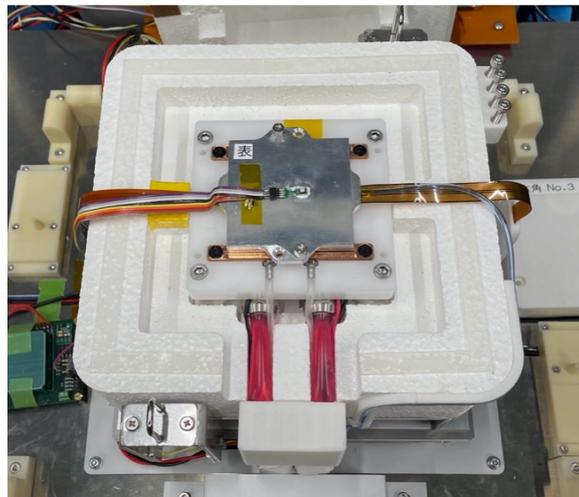


図 3：ピクセルモジュールの検査システム。