

エネルギーフロンティアグループでは、LHC/ATLAS 実験の推進、高輝度 LHC/ATLAS 実験に向けた建設準備、ILC をはじめとする将来のコライダー実験の実現に向けた研究活動を行っている。

■ 2024年のLHC稼働実績

2022年から継続しているLHCの Run 3 運転は3年目の運転を終えた。LHC加速器では、衝突点最終収束系のうち Inner Triplet 収束磁石系への放射線ダメージが注視が必要な状況で、想定される放射線耐性の限界とされる 30 MGy に到達しないように放射線量の分散を行うため、線量が高くなる位置を振り分けるためにATLAS衝突点 (P1) におけるInner Tripletの極性を入れ替えた運転を行い長寿命化を諮った。2024年の運転では積分ルミノシティを稼ぐためにLHCは本来の計画日程を3日前倒してコミショニングを始め、予定した4週間のビーム・コミショニングを順調に仕上げ、3日前倒して4月5日に $\sqrt{s} = 13.6$ TeV での安定ビーム衝突を得た。その後順調に強度の積み増しを行い、バンチあたりの陽子数 1.55×10^{11} に到達した。一方、コリメータでの大幅なビームロスが観測されたために β^* は4月以降 36 cm に制限されていたが、様々な緩和策を施した結果、7月以降にはノミナルである 30 cm に回復させることができた。電子雲に起因する熱負荷への対策では「セクター78」と「セクター81」の間の冷却容量の再配置を行うなどの改善策が有効に働き、より高品位のビームをバンチ数を増やして投入することができるようになった。結果として、2023年よりもゆとりをもって高い輝度を実現でき、レベリングを行ったピーク衝突輝度 $2.15 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、ピーク輝度でのバンチ交差あたりの衝突数 (パイルアップ) $\langle \mu \rangle \simeq 64$ をキープしながら、安定して統計量を積み増すことができた (図1)。最終的に2024年の運転目標であった 110 fb^{-1} を大幅に凌駕する 124 fb^{-1} の積分ルミノシティの供給をATLAS/CMS それぞれについて達成した。年間を通じた平均供給ルミノシティは $0.83 \text{ fb}^{-1}/\text{day}$ 、1日あたりの供給ルミノシティの最高記録としては $1.5 \text{ fb}^{-1}/\text{day}$ を記録した。これはLHC全期間を通じて最高のパフォーマンスである。Run 3 のこれまでの全期間におけるATLASへの供給ルミノシティは 195 fb^{-1} 、LHC全期間の総計としては 379 fb^{-1} となった。

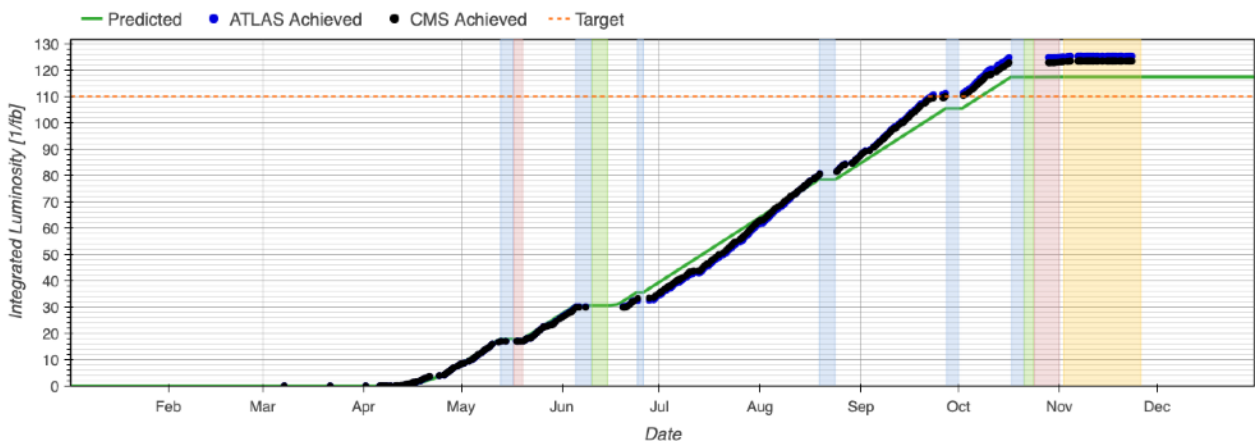


図1：2024年のLHC運転における計画と実績の比較。 <https://bpt.web.cern.ch/lhc/statistics/2024/>

■ 2024年のATLAS運転状況

ATLAS実験の2024年のデータ取得はビーム・コミッションング時から順調に立ち上がり、5月末の段階でデータ取得効率 94.3% で、良好な稼働率でデータ収集を行うことができた。レベリングを行った結果バンチ交差あたりの平均衝突数 $\langle\mu\rangle$ は 64 程度であり、レベル1トリガーは約 95 kHz で運転した。取得されたデータのうち約 110 fb^{-1} は物理解析に供することが可能である。物理解析に用いられないデータのうちの多くは6月中旬に発生したマグネット主冷凍機の熱交換器で部分的に目詰まりが発生したことによる磁場の消失によるものである。ミュオントリガーでは、Run 3から New Small Wheel (NSW) と呼ばれる新しいステーションがエンドキャップ側内層のトリガーシステムを担い、トリガー性能の向上に寄与している。NSWを構成する測定器は sTGC および Micromegas の2種類あるが、うち sTGC の発行するパッド・トリガーを用いた TGC とのコインシデンスは 2023 年にすでに稼働し、タイルカロリメータとTGCとのコインシデンスも含めて7—8 kHz のトリガーレートの削減に寄与できていた。2024年の運転では、sTGC がアクティブなトリガーセクター (TS) の割合を 2023 年実績の 70% から100% にまで引き上げることができ、2024 年には削減したレートは約 15 kHz に到達した(図2)。今後はsTGC の発行するストリップ・トリガーのコミッションングにも取り組んでいく。一方Micromegasを用いたコインシデンスも2024年から運用を開始しているが、トリガー効率の改善が重要である。ATLAS ミュオントリガーの運転にあたっては KEK ATLASグループをはじめとする日本グループが主導的貢献を続けている。

Run 3 からアップグレードした液体アルゴンカロリメータ (LAr) のトリガーシステムでは、デジタル化した信号をもとにより高いシャワー角度分解能と E_T 分解能を Feature Extractors (FEXes) というFPGAを用いた後段トリガー判断機能に供給する。3種類ある FEX のうち電子 FEX (e-FEX) はすでに2023年に稼働しておりレベル1トリガーレートを 10% 削減することに寄与していた。2024年には、残りのジェット FEX (j-FEX) およびグローバル FEX (g-FEX) のコミッションングが完了した。この移行により、例えば大半径ジェット (large-R jet) にネイティブなレベル1トリガーを発行できるようになった。

■ ATLAS物理解析

物理解析については、Run 2 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ の 140 fb^{-1} を用いた解析論文が総計で 385 本を数え、 $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ の Run 3データを用いた解析もこれまでに13本の論文を出版した。Run 2 全データセットを用いた解析も引き続き進行していてこの半年余りで 45 本を積み増している。この中には全く新しい解析もあるが、すでに一度同じデータセットで解析されたものを、解析技術や

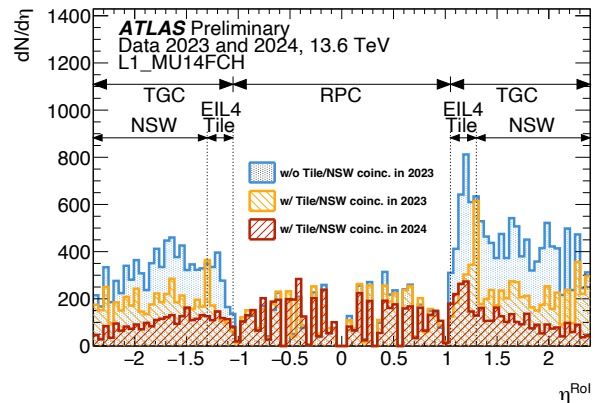


図2：(上) 100 fb^{-1} 超えを果たした際のATLASオペレーションチームの主要メンバーの集い。後列左から4番目が素核研EFグループの青木氏。(下) 2024年のミュオントリガーの運転において、タイルカロリメータ及びNSWとのコインシデンスによってエンドキャップ部のトリガーレートが削減した様子。

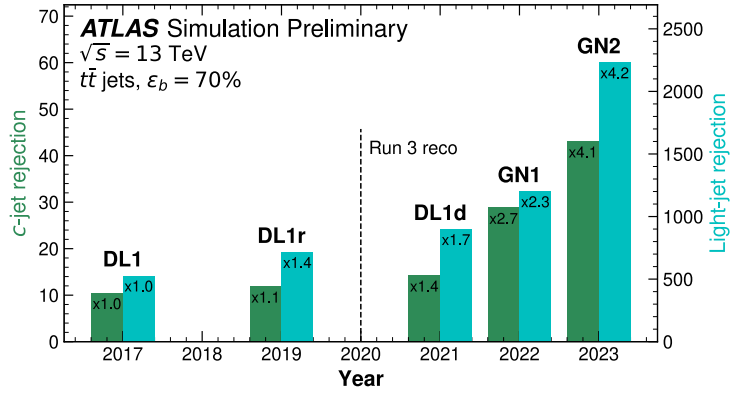
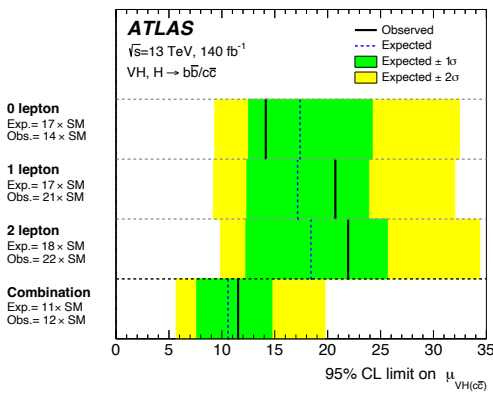


図3：(左) $pp \rightarrow VH, H \rightarrow cc$ 過程の[断面積×分岐比]の標準模型予測値に対する相対比へ95%信頼度での上限値 [arXiv:2410.19611]. (右) ATLAS実験におけるジェット・フレーバタグ分類器の性能の発展の歴史 [FTAG-2023-01].

パフォーマンスの進展を取り入れて結果を更新したものも含まれる。ヒッグス $VH(bb), VH(cc)$ 生成の測定のRun 2 全データセットを用いた解析では、既に観測が確立した $H \rightarrow bb$ 崩壊との分離が非常に困難な $H \rightarrow cc$ 崩壊への直接制限に挑んでいる。最初の解析 [EPJC 82 (2022) 717] では95% 信頼度で標準模型の[断面積×分岐比]に対して26倍まで、ヒッグス結合定数の標準模型に対する倍率に焼き直して $|\kappa_c| < 8.5$ まで (いずれも観測値) 制限をつけていたが、今回の解析の更新 [arXiv:2410.19611] によってこれをそれぞれ 11.5倍・ $|\kappa_c| < 4.2$ (いずれも観測値) にまで大幅に更新した (図3左)。この解析では $H \rightarrow bb$ と $H \rightarrow cc$ を同一のフレーバタグ分類器を用いて統合的に解析しているため、 $|\kappa_c/\kappa_b|$ について共通の系統誤差をキャンセルした形で導出できる。この結果も前回の $|\kappa_c/\kappa_b| < 4.5$ という結果に対して $|\kappa_c/\kappa_b| < 3.6$ (95%信頼度) というより強い制限を与えている。今回の解析結果の向上には Recursive Neural Network (RNN)を用いたフレーバタグ分類器が用いられており、それ以前のフレーバタグよりも性能が大きく寄与している。注目すべきは、Run 3 になって開発された Graph Neural Network (GNN)を用いた最新のフレーバタグ分類器が Run 2 + Run3 データセットでの解析を対象としてリリースされており、これはさらに飛躍的に分類性能が向上している (図3右) [FTAG-2023-01]。Run 3 による統計量の積み増しと相補的な形で、今後も解析性能が向上していく余地が大きいと見込まれている。

■ 高輝度LHC向けアップグレード

高輝度 LHC 実験のための検出器アップグレードに関しては、日本グループは、シリコンストリップセンサー、シリコンピクセル検出器、エンドキャップ部ミュオントリガー用エレキの開発、量産、建設において中核的な役割を果たしている。ストリップセンサーに関しては、日本が製造予定の 6,350 センサー全ての量産を完了した。ピクセル検出器に関しては、センサーの量産を昨年度から開始し、日本で製造予定の 2,410 枚の製造を終えた。昨年度実施した量産試作の段階で、1日に3モジュールの製造と検査を可能にするシステムを構築済みであったが、1日7モジュールの量産を可能とする態勢にするため、夏季に計測機器やストレージの拡充を行った。実機モジュール量産を開始するための第2次レビューが11月下旬に実施され、これを承け本量産が徐々に本格化する見込みである。量産試作として昨年度製造・検査したモジュールは現在、18枚を1組にして搭載したバレル部構造体の量産試作機に統合されている。初号機のバレル部構造体はすべてのモジュールが日本で生産・検査されたもので構成され、量産開始のためのレビューに向けた様々な試験が実施されている。アップグレードされた内部飛跡検出器 (ITk) のオンライン・ト

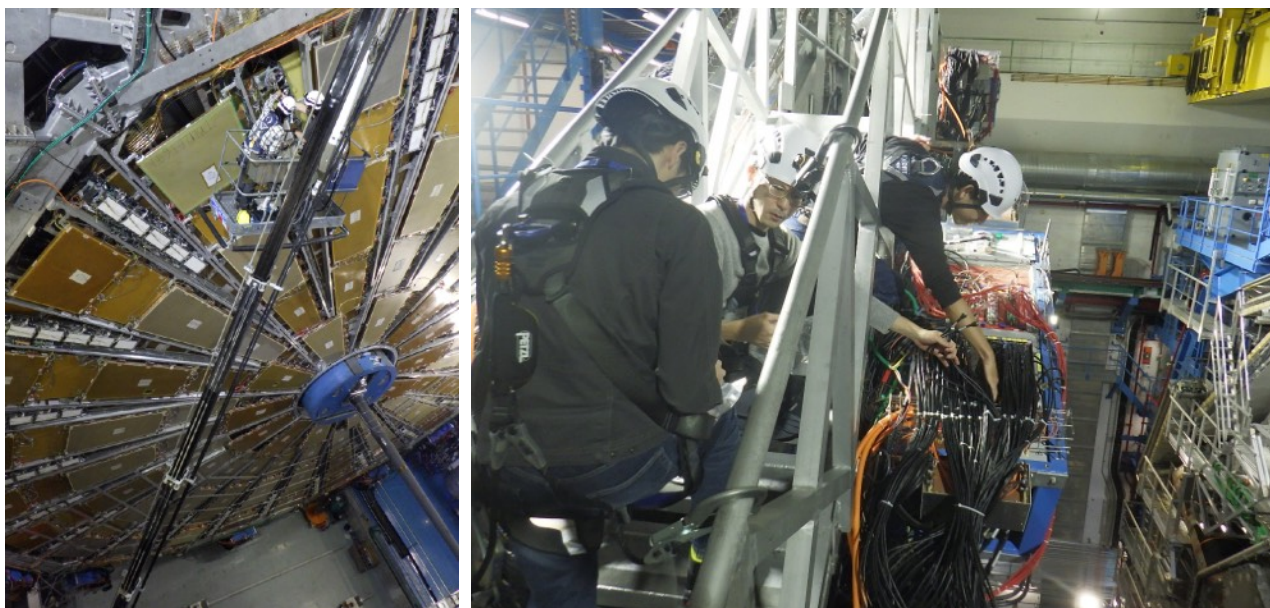


図4：2024年末のシャットダウン期間にATLAS TGCにアクセスし、高輝度LHC向けのアップグレードした前段回路を実際のTGC測定器の一部に（一時的に）インストールしたデモンストレーション作業の風景。

ラッキングに関連して、GPUなどアクセラレータをもちいた高速飛跡再構成の開発研究も開始している。並列計算を可能にすることを主眼に開発中の飛跡再構成アルゴリズムについて、ITkからのシミュレーションデータをもちいて詳細に性能評価・開発を進めている。

エンドキャップ部ミュオントリガー用エレキでは、前段回路を約1,500枚、ミュオントリガーと検出器の読み出しを行うトリガープロセッサボードを約100枚量産する予定である。前段回路の量産では製造と並行してKEKにおいて検査を行っている。前段回路については1,200枚以上の検査を既に完了したが歩留まりは99.7%と極めて高く、計画通り今年度で全て納品を完了できる見込みである。トリガープロセッサボードでは第2試作機が完成し、期待通りの性能で稼働している。現在は2025年の春に行われる最終設計レビューに向けて設計の最終チェックを進めている。さらにトリガープロセッサボード上の大規模FPGAに組み込むトリガー、読み出しおよびボード制御ファームウェアの開発を進めており、シミュレーション上で見られていたトリガー非効率をほとんど解消させた。エンドキャップ部ミュオントリガー用エレキは、高輝度LHCに向けたLHCの長期シャットダウンが始まるとともに最初にインストールされる装置であるため、スムーズなインストール作業が求められる。そこで年末のLHC短期シャットダウン中に、インストールのデモンストレーションをCERN現地のATLAS実験エリアにて実施した。検出器に設置された現行の前段回路を一部取り外し、そこに現在量産中の前段回路を設置した。リフトを操作しての25mの高さで作業を行った様子を図5に示す。このデモンストレーションを通じて、インストール作業の最適な手順が確立され、また設置された新前置検出器は疑似検出器信号によって全ての機能が期待通りに稼働することを確認した。

■ ILCと将来を見据えたR&D

素核研エネルギーフロンティア(EF)グループは、IDT-WG3、ILC-Japan 物理および測定器ワーキングタスクフォース、ILC-Japan 共同研究タスクフォースなどを通じて、ILCをはじめとする将来のエネルギーコライダー実験の実現に向けた研究活動に積極的に寄与している。最近では、ILD測定器をILCとFCCなどの円形コライダーに配置した場合のMachine-Detector Interface (MDI)の設計を進めている。加えて、ILDのタウを含む精密な終状態測定、ならびに長寿命粒子の再構成による新物理への感度に関して物理研究を続けている。これらの研究はECFAの将来ヒッグス/トッ

プ/電弱ファクトリーに関する3年間のプログラムの一環を成しており、このプログラムは取りま
とめに向かっている。また、7月に東大で行われたLCWS2024 国際会議では、EFグループの
Daniel Jeans がプログラム委員長を務めた。2024年6月12日に素核研ワークショップ「将来コ
ライダー実験に向けた共同研究」を開催するなど、コミュニティ・ビルディングにも積極的に力を入
れている。2024年12月18日には、素核研ワークショップ「Workshop for Tera-Scale Physics
and Beyond」を開催し、高輝度LHCと将来の電子陽電子コライダーの物理研究をテーマに幅広く
議論した。

EF グループは、LHC 実験の先の将来のコライダー実験への導入、建設、運転までを見据え、
半導体検出器開発をコアプロジェクトとして検出器の基礎開発にも携わっている。モノリシック
CMOS センサの高放射線環境下での動作検証を日本の Belle II グループ、ストラスブールの半導
体検出器グループと協力して進めている。CERN の半導体検出器グループ、ジュネーブ大学と共
に、高い時間分解能を持つ時間応答に優れる SiGe BiCMOS センサや AC-LGADピクセルセン
サーの開発を進めている。これらの開発を国際的認知・強調のもとでさらに強力に進めるため
に、欧州の ECFA-DRD3 に参入している。また、将来実験において不可欠となることが想定され
るエレクトロニクスと機械学習の開発も進めている。エレクトロニクスでは、コライダーエレクト
ロニクスフォーラムの研究会を開催する、このような流れに整合する形で、将来のエネルギーフ
ロンティア実験のためのR&Dを一つの主軸とするJSPSの大型科研費（国際先導研究、代表：花垣和
則 機構理事）「力の統一的理解に向けたエネルギーフロンティアの次世代への展開と国際的人材
育成」がR6～R12年度で採択された。国内外の大学・研究機関との共同開発をさらに強力に進め
ていく。

(文責：素核研EFグループ 生出 秀行)