

エネルギーフロンティアグループでは、LHC/ATLAS 実験を中核として、現行実験による物理成果の創出、高輝度 LHC (HL-LHC) に向けた加速器・測定器のアップグレード、さらに次世代エネルギーフロンティアを拓くコライダー実験と基盤技術の研究開発を一体的に推進している。2026 年上半期には LHC Run 3 の物理運転を完遂し、現在は LS3 における大規模なアップグレードへ移行するとともに、Run 3 データを用いた物理解析、HL-LHC トリガー開発、ITk Pixel 量産、将来コライダーに向けた検出器 R&D を並行して進めている。

■ LHC Run 3の完遂とATLASの運転実績

LHCのRun 3は 2026 年 6 月をもってすべての物理運転プログラムを終了した。最終年となる 2026 年の pp 衝突運転は極めて順調に進み、目標の 30 fb^{-1} を上回る 32.9 fb^{-1} の積分ルミノシティがATLASに供給され、 31.0 fb^{-1} が記録された。Wボゾン質量精密測定を目的とした低パイルアップ運転では、平均パイルアップ数 $\langle\mu\rangle \simeq 3$ の条件で約3週間の運転を行い、 1.26 fb^{-1} を記録した。このうち 1.22 fb^{-1} が物理解析に利用可能であり、目標を上回るデータセットを確保した。

重イオン運転では、6月前半に Pb-Pb 衝突を実施し、 2.7 nb^{-1} が供給、うち 2.4 nb^{-1} が物理解析に利用可能となった。その後、Run 4 での大強度運転を見据え、バンチあたり陽子数 2.3×10^{11} を目標とするビーム試験や電磁石のクエンチ試験等を実施し、6月29日に予定通り Long Shutdown 3 (LS3) へ移行した。

Run 3 全体では、ATLASに供給された pp 積分ルミノシティは 351 fb^{-1} に達し、 332 fb^{-1} が記録され、 312 fb^{-1} が物理解析に利用可能となった。当初目標の 300 fb^{-1} を大きく上回り、Run 3 単独で Run 2 の約2.5倍、Run 2+3 の合計では Run 2 単独の約3.5倍となるデータセットを構築した。この高統計データセットは、ヒッグス粒子の精密測定、希少過程の測定、標準模型を超える新物理探索を次の段階へ進めるための基盤となる (図1)。

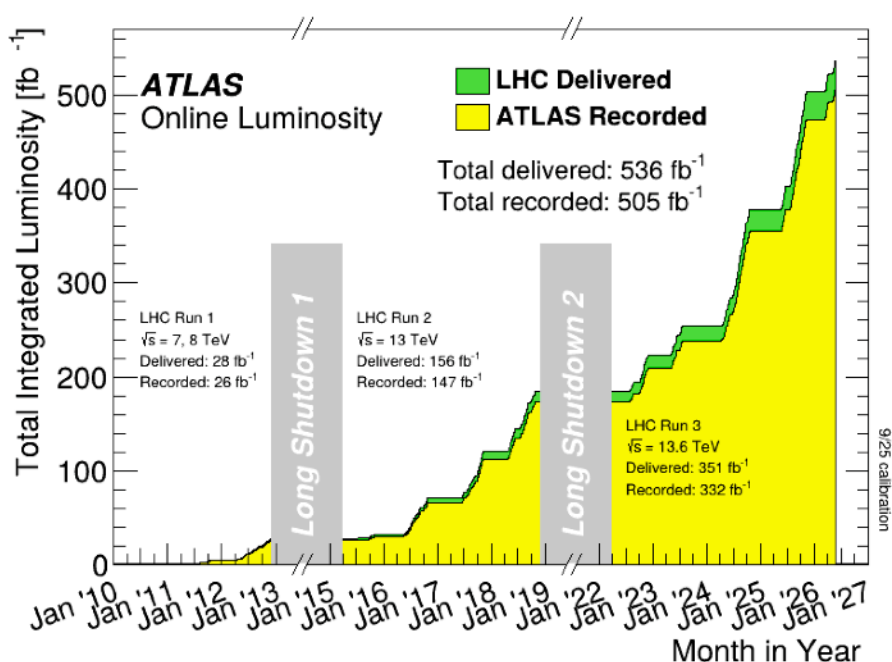


図1：LHC Run1からのATLAS実験におけるデータ取得の全記録。

Run 3 最終盤においても ATLAS 検出器は高い安定性を維持した。日本グループが担当するエンドキャップ・ミューオントリガー (TGC) および Level-1 トリガーは、4月以降も概ね安定して稼働した。一部セクターで Resync が頻発した際にはしきい値調整によって異常信号を抑制し、HV モジュールの故障に対してはダミーヒットを用いることでトリガーホールを最小化しながら運転を継続した。6月の重イオン運転では冷却タービン故障や Sector Logic ボードの不具合に伴う一時的な読み出しビジーも発生したが、監視強化やタイミング調整等によりデータ取得への影響を抑え、Run 3 の運転を完遂した。

ピクセル検出器も最終データ取得まで高い安定性を維持し、IBL で 99%、その他の層で 93% のモジュール稼働率を維持した。物理解析可能なデータの割合は通常パイルアップで 99.7%、低パイルアップで 100% に達した。さらに、総放射線量が $10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ を超える極限環境下で衝突データを取得し、特に最内層 IBL では総放射線量 $2.7 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ に達する環境で、最大 1,000 Vまでの IV 特性を含む詳細な評価データを取得した。これは HL-LHC で想定される高放射線環境における半導体センサーの性能理解に重要な基礎データとなる。

■ LS3への移行

LHC は6月末から約4年間の LS3 に入り、2030 年 5 月末の Run 4 ビーム運転開始に向けてアップグレード作業が進行する。LS3 では、加速器と ATLAS の双方で HL-LHC に対応する大規模な改修が進められる。加速器側では、Run 4の大強度運転を模擬したビーム試験により装置への熱負荷等に関するデータを取得するとともに、地上のフルスケール検証設備「IT String」において新超伝導磁石システム全体の試験を進め、磁石システムの健全性を実証している。今後は、大強度運転に対応する特定のビーム真空チェンバーの改修、熱負荷問題を解消するための磁石内部のビームスクリーン処理、さらにクエンチ発生後の冷却復旧時間短縮に向けた運用手順の最適化が重要な課題となる。

ATLASでは、旧内部飛跡検出器 (Pixel, SCT) の解体・撤去作業がスケジュールを大幅に前倒して進み (図2), 主要な新型検出器である ITk, HGTD 等の量産・試験も進展している。一方、DC-DC電圧レギュレータ (bPOL 電源チップ) について、放射線照射と低温環境が重なった際に、電源オフ時の出力異常が発生する問題が確認された。スケジュールに余裕のあるPixelでは修正版チップの完成を待ち、猶予のないStripなどのシステムでは基板回路の設計変更によって異常電圧の影響を抑えるなど、システムごとに最善の対応を進めている。



図2：日本グループによる内部飛跡検出器のデコミッショニング作業。(左) 廃棄用コンテナへの投棄、(右)ラック解体のためのケーブル作業。

■ TGCアップグレード

LS3 開始とともに、TGC では Run 3 で使用した現行システムの運転から Phase-II Upgrade の現場作業へ活動の重点を移した。地下のエレキハット (USA15) では現行エレクトロニクスのデコミッショニングと機器の回収・撤去を進め、ATLAS cavern では Big Wheel 分離に先立って M1—M3 間のケーブル切り離しや不要ケーブルの撤去を予定通り完了した。7月に Big Wheel を分離した後は、各セクターで旧 PS board を中心とする既存システムの撤去、新 PS board を含む



図3：(左) TGCアップグレードにCERNに集結したATLAS日本グループのクルー。(中央) 現行エレクトロニクスへのデモミッション。(右) Big Wheelにおける新 PS board を含む新システムのインストール作業。

新システムのインストールおよび動作試験を順次進めている。8月末からは A-side と C-side の双方で、高所セクターを含むインストール作業を並行して進めている（図3）。

これと並行して、新システムとバックエンドとの統合に向けた開発・準備も進めている。CERNのテストベンチをLS3のインストール作業に対応する形へ再構築し、必要な試験機材や作業環境の整備を進めた。

ミューオントリガーの Sector Logic では、fixed-latency でのデータ送受信回路のファームウェアへの統合、新 Sector Logic 基板の試作・設計修正を進めた。また、FELIX から Sector Logic への clock recovery を含むデータ伝送試験、Tile Calorimeter とのデータフォーマットおよび配線の検討を進め、USA15 内の光ファイバー配線設計も確定した。Run 4 で必要となる光ファイバーの調達も開始している。

■ITk Pixel量産と統合・DAQ開発

ITk Pixelモジュールについては館山での量産を継続し、1日7台の生産体制を維持している。4月時点で累計 1,600 台を超えていた生産数は、9月時点で約 2,200 台に達し、品質検査（QC）完了モジュールも 1,450 台を超えた。国内で厳格な検査・試験を完了した良品モジュールについては、初の大規模なCERN輸送を目前に控え、まず約 280 台を送付する準備を進めている。

量産工程では、部材供給を考慮しながら前段検査の省略や短期間の計画休止を組み合わせ、生産ラインを維持している。パリレン漏れ、チップ欠け、ワイヤーボンド保護材評価等の品質課題に対しては、追加評価試験を導入し、量産工程へのフィードバックを迅速化した。8月半ばからは Outer Barrel 向け冷却セル接着工程を再開した。さらに QC 不合格モジュールの追試・デバッグを迅速化するため、館山、阪大、KEKにサテライト・テストベンチを順次整備・稼働している。

量産の次の段階となる CERN での統合・設置に向け、モジュールをサポート構造に設置し、統合試験を行う構造ユニットである Loaded Local Support (LLS) の品質評価試験システムやDAQソフトウェアの開発も進めている。今後想定される検出器受入試験、ローディング統合作業、ケーブル接続等を見据え、地上アセンブリホール「SR1」で必要となる試験・統合環境の準備を進めている。地下設置後は検出器への直接アクセスが大幅に制限されるため、地上での統合試験は検出器特性の理解と動作確認を行う最後の重要な機会となる。

将来の運転・キャリブレーションへの円滑な参画を見据え、日本国内への FELIX system の導入も進めている。これと並行して、CERN でのモジュール組み上げ時に使用される DAQ システムを想定した国内システム試験環境を構築し、第1回の試験キャンペーンを完了した。LLSのQCおよびシステム動作テストで使用するソフトウェアとインターフェースの整備、冷却性能等の評価・解析ソフトウェアの開発を進めている。



図4：ITk Week集合写真（2026年9月）。

これらの活動を通じ、単にモジュールを量産するだけでなく、量産終了後の統合、DAQ、キャリブレーション、運転までを一貫して担える国内の技術基盤を構築している。また、CERN での長期的な統合・試験活動について、ポスドクやスタッフに加えて修士課程初期を含む学生も参加できる体制の整備を進めている。

ITk アップグレードに強く関連し、7月15日には、高品質なセンサー開発への貢献により浜松ホトニクス株式会社が「ATLAS & CMS インダストリアル・アワード」を受賞し、EFグループもセンサー開発に関わった研究者が授賞式に参加した。8月31日から9月4日には福岡で日本開催としては初となる「ITk Week」を開催し、約103名が現地参加した（図4）。本会議はKEK・九州大学を中心とする ATLAS 日本グループがホストを務めた。

■トリガー開発

HL-LHC では、現行 Run 3 を大幅に上回る高いパイラップ環境において膨大な飛跡再構成をリアルタイムに処理する必要がある。ATLAS TDAQ では、この計算負荷に対応するため、CPU による再構成をバックアップとして維持しつつ、GPU を本格的に導入するヘテロジニアスな Event Filter ファームウェアの採用が正式に決定された。これは HL-LHC におけるトリガー計算基盤を大きく転換するものであり、日本グループもオンライン飛跡再構成と GPU 計算技術の開発に継続して参画している。

GPUを用いたオンライン処理では、計算速度だけでなく、CPU 実装と同等の物理的精度を維持することが重要となる。このため、GPU 上でのカルマンフィルター計算について、数値精度と計算効率を両立する手法の研究を進めている。また、長寿命粒子探索を念頭に、ストリップ検出器における GPU ベースのクラスタリング手法を開発し、従来の標準的な飛跡再構成では扱いにくい特殊な飛跡トポロジーへの対応を進めている。さらに、飛跡の電離損失 dE/dx を利用した新規トリガーについても研究を進めており、通常の運動量・飛跡情報だけでは捉えにくい新物理事象をオンラインで選択する可能性を検討している。

今後は、GPU を用いたオンライン処理について国内の各実験・研究グループが蓄積する知見を共有する研究会等を開催し、HL-LHC 時代の大規模計算を支える国内コミュニティの技術基盤形成にも取り組む予定である。

■Run 3データによる物理成果

Run 2 および Run 3 の大規模データセットを用いた ATLAS 物理解析は活発に進展している。特に、ヒッグスセクターの精密測定と新物理探索の双方において、データ量の増加に加え、機械学習や新しい再構成技術による解析性能の向上が物理感度を大きく押し上げている。

ヒッグス粒子の特性測定では、Run 2 データを用いた26の個別解析を統合し、主要な素粒子への結合定数を 5~12% の精度で決定した。また、チャーム湯川結合について $|\kappa_c| < 4.1$ (κ は標準模型の湯川結合に対する補正係数)、ヒッグスが“invisible”に崩壊する分岐比について $B_{\text{inv}} < 12\%$ (いずれも 95% CL) という、これまでで最も厳しい制限を得た[\[arXiv:2608.07332\]](#)。これはヒッグス粒子が標準模型で予言される粒子との相互作用をどこまで精密に再現するかを検証するとともに、標準模型に含まれない粒子との結合を間接的に探索する成果である。

ヒッグス自己結合を検証するヒッグス対生成では、 $HH \rightarrow bb\tau\tau$ チャンネルについて Run 2 と Run 3 (2022–2023年) データを統合した最新結果が公表され、標準模型の予測に対する相対信号強度に対して $\mu_{HH} < 5.3$ (95% CL)、観測有意差 2.6σ (期待値 1.2σ) が得られた (図5)

[\[arXiv:2607.26879\]](#)。Transformer ベースのイベント分類と b -ジェット識別性能の改良により、解析手法の高度化だけで約 180 fb^{-1} の実データ追加に相当する 40% の感度向上を実現した。この結果は、今後さらに大きなデータセットを用いる際、単純な統計量の増加だけでなく、解析アルゴリズムの高度化がヒッグス自己結合測定の感度を大きく左右することを示している。

$X \rightarrow bb$ 崩壊など、強くブーストしたジェット系の同定では、Transformer ベースの新しいフレーバー識別アルゴリズム「GN3X」が開発され、従来の「GN2X・GN2X τ 」から性能を向上させた[\[ATL-PHYS-PUB-2026-013\]](#)。

FlashAttention や Register token 等の新しい深層学習技術を導入するとともに、Run 2 と Run 3 の異なる検出器・pile-up 環境をバランスよく学習に用いることで、データ取得期間の違いに対する堅牢性を高めた。さらに、QCD背景をフレーバーごとに4つのサブクラスに分けて学習する手法や、 $W \rightarrow qq$ の識別を行う独立した出力クラスを導入した。 $H \rightarrow bb$ の識別効率70%のベンチマークで、inclusive QCDジェットの棄却率が約25%、fully-contained トップ・ジェットの棄却率が約2倍、 $W \rightarrow qq$ の棄却率が約2.4倍向上した。

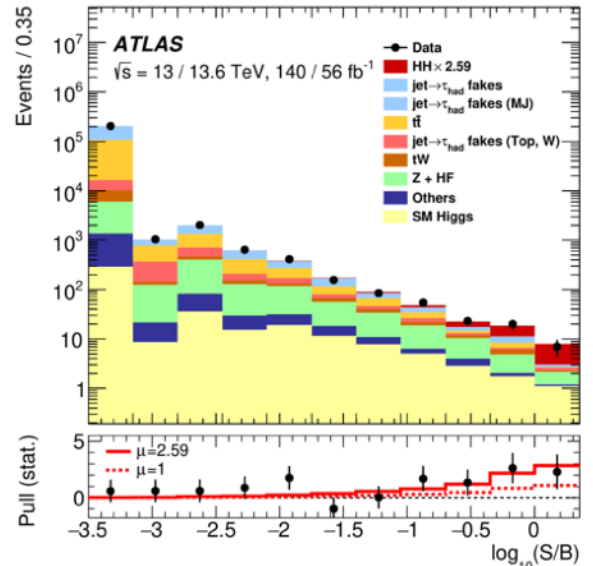


図5: $HH \rightarrow bb\tau\tau$ について、全チャンネル・全期間の事象数を、機械学習識別器から得られた予測 S/B 比ランクにソートして表示したもの。上段はデータと最適フィットによる信号・背景モデル、下段はフィット背景からのデータのずれ (統計的有意度) を示す。実線は最適フィット信号、破線は標準模型の予測。

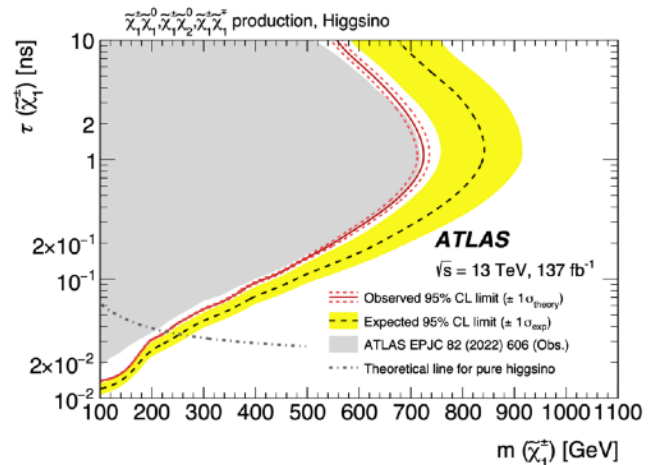


図6: ヒグシーノの寿命 (縦軸) と質量 (横軸) に対する排除限界。赤線の内側が排除領域を示す。灰色の一点鎖線は、荷電ヒグシーノとニュートラリーノの質量差が標準模型粒子のループ補正のみで生じる場合の理論の寿命予測を示す。

「GN3X」はRun 3におけるブースト・ヒッグス解析の標準識別子として採用されることとなった。

新粒子探索では、長寿命荷電粒子が検出器内部で崩壊し、飛跡が途中で消える「消失飛跡」解析を更新した [JHEP 07 (2026) 152]。本解析は、SUSY が予言するチャージノ（ウィーノまたはヒグシーノ）が、暗黒物質候補であるニュートラリーノと極めて低エネルギーの $\pi^\pm$ 粒子に崩壊する完全に縮退したシナリオを標的としている。機械学習を用いて約 200 MeV という非常に低い運動量の $\pi^\pm$ 粒子を高いノイズ環境から識別した。有意な信号超過は観測されなかったが、ヒグシーノの質量・寿命に対して世界最高水準の制限を設定し、理論的に予測される寿命 0.03 ns で 225 GeV、最大感度は寿命 1 ns では最大 720 GeV の質量領域を排除した（図6）。今後は Run 3 フルデータセットを用いて、さらに広い質量・寿命領域の探索を進める予定である。

■文科省ロードマップ2026

2019 年から 2028 年まで実施される先行建設事業の後継として、2029 年以降の実験立ち上げから物理解析による科学成果の創出までを一貫して担う新計画「高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による宇宙の真空構造の解明と新物理の探究 ―エネルギーフロンティアの進化―」を申請し、審査を経て掲載された（図7）。本計画では、HL-LHC によるヒッグス場の詳細解明と標準模型を超える新物理の探索に加え、将来のエネルギーフロンティアを支える超高磁場超伝導磁石、先端半導体検出器等の基盤技術開発も重要な柱として位置づけている。

今回公表された「[ロードマップ2026](#)」では、宇宙の真空構造や標準模型を超える新物理という根源的課題に対して明確な科学目標を持つこと、日本グループが加速器・検出器開発、運営、データ解析において世界最高エネルギー実験の中核を担っていること、さらに国内の共同利用・共同研究体制を通じた人材育成基盤が評価された一方で、留意点も示された。今後は計画を精緻化し、先行事業から HL-LHC における科学成果創出へ確実に接続するとともに、その先のエネルギーフロンティア開拓につながる技術・人材基盤を構築していく。

高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による宇宙の真空構造の解明と新物理の探究 ―エネルギーフロンティアの進化―

実施主体：高エネルギー加速器研究機構



図7：「ロードマップ2026（暫定版）」に掲載された新計画の概要。

■将来ヒッグスファクトリーと次世代検出器技術

将来のエネルギーフロンティアについては、IDT-WG3, ILC-Japan の物理・測定器ワーキングタスクフォース、共同研究タスクフォース等を通じて、ILC, FCC-ee を含むヒッグスファクトリーの実現に向けた検討を継続している。また JAHEP 将来計画委員会における「大方針」およびヒッグスファクトリーに関する議論に参画し、コミュニティの意見醸成と基本的な位置づけの整理に貢献した。また、リニアコライダー国際会議 LCWS2026 で Local Organization Committee (LOC)として運営に参加・協力した。

物理・測定器研究では、ILD を ILC や FCC-ee に配置した場合のマシン・検出器インターフェース (MDI) の設計、Z-pole 運転における背景事象が TPC へ与える影響、 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ を用いた量子トモグラフィ効果の観測可能性についてシミュレーション研究を進めた。

将来コライダーを支える検出器技術では、半導体検出器をコア・プロジェクトとして、モノリシック CMOS センサー、高速タイミング検出器、新材料センサー等の研究開発を進めている。

モノリシック CMOS センサーでは、低物質質量トラッカー候補である MALTA2 について複数回のテストビーム評価を行い、テレスコープとしての運用経験を蓄積した。現在は Trigger Logic を含む多層テレスコープの構築を進め、より本格的なトラッキング効率・検出効率評価環境の整備を進めている。内部増幅層を持つモノリシック・ピクセル検出器を目指す CASSIA では、CASSIA1 の2次元 IR レーザースキャンによって開口率の低さや非同期ゴースト信号の発生機構の理解を進めた。さらに、高開口率を目指して設計した CASSIA2 の製造を完了し、チップ入手後の性能評価開始に向けた準備を進めている。

高速タイミング検出器では、 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ のピクセル化 AC-LGAD において約 25 ps の時間分解能を達成し[\[NIMA 1093 \(2027\) 171935\]](#)、カーボンドープによる放射線耐性向上サンプルで、 $2.3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 照射後にも約 40 psを維持する優れた放射線耐性を実証した。今後は ドープ条件の最適化によってさらなる放射線耐性向上を目指す。また、RARiS での陽子照射実験では、AC-LGAD および DC-LGAD の双方において、ビーム照射直後に発生する single-event burnout (SEB) を観測した。平均電場約 $12 \text{ V}/\mu\text{m}$ 付近で再現可能な発生条件を確立し、厚さや電場依存性を含む系統的なSEB研究への道を開いた。

新材料センサーでは、厚さ $25 \mu\text{m}$ の CIGS センサーを重イオンビームで評価し、約 4 pC の信号を観測するとともに、放射線損傷がアニーリングによって回復することを確認した[\[NIMA 1091 \(2026\) 171749\]](#)。また、GaN センサーによる α 線信号の検出に成功し、MIP 検出を目指した GaN-LGAD サンプルの評価も継続している[\[Jpn. J. Appl. Phys. 65 \(2026\) 016501\]](#)。

検出器技術のコミュニティ展開も進めている。9月初旬の PIXEL2026 国際会議では、グループの外川、中村、生出を含む素核研の多くのメンバーが LOC として運営に参加した。ITDC Platform-B の「半導体検出器量産についての研究会」では、ITk Pixel 量産で蓄積した技術・運用ノウハウを国内コミュニティに共有し、7月には Belle II グループの LS2 アップグレードに関連して、量産サイトである館山への訪問を実施した。

■国際的人材育成と社会への発信

将来のエネルギーフロンティアを担う人材育成では、JSPS 国際先導研究「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」（代表：花垣和則）を通じて、若手研究者の海外派遣を継続している。2026年度には、第2回までの公募によって物理、超伝導磁石、MAPS/AI エレキ等の先端技術を扱う「コース1」で延べ5名、国際組織や実験推進を担う人材育成を目的とする「コース2」で延べ20名（うちPD 4名）を採択・派遣した。現在は第3回

公募を実施しており、今後も若手研究者が国際的な研究環境で経験を積む機会を継続的に提供する。さらに、国際先導の採択・派遣者である総研大の小野颯真氏が ATLAS Breakthrough Prize PhD Grant 2026 に採択され、小野氏はこの枠組みを活用して9月より CERN に長期滞在する。

社会への発信では、おとなのサイエンスカフェ第17夜「宇宙の始まりを探る実験 LHCで何が見えてきたのか」（2026年2月）、日本物理学会第46回オンライン物理講話「ヒッグス粒子のその先へ 高輝度化するLHCが探る自然界の新たな姿」（2026年8月）を開催した。また、8月の機構長定例記者会見において HL-LHC 計画とアップグレードを紹介するなど、LHC の科学成果、HL-LHC の意義、将来ヒッグスファクトリーへの展望について社会への発信を行った。

■総括

Run 3の完遂により、ATLAS はRun 1からの累積で 500 fb^{-1} を超える高統計データを蓄積し、ヒッグス物理の精密化と新物理探索を次の段階へ進める基盤を確立した。一方、LS3 では TGC や ITk をはじめとする Phase-II Upgrade の現場作業が本格化し、日本グループの活動も「Run 3 を運転する段階」から「HL-LHCを建設し、将来の物理成果を準備する段階」へ移行している。

今後は、ITk Pixel 量産から CERN での統合・設置、TGC トリガーアップグレード、GPU を含む HL-LHC トリガー・DAQ 開発を着実に進めるとともに、Run 3 データを用いたヒッグス物理および BSM 探索の成果創出を加速する。これらを将来ヒッグスファクトリーや次世代エネルギーフロンティアに向けた半導体検出器、計算技術、人材育成と接続し、現行実験の成果から次世代実験の実現までを連続的に支える研究基盤の形成を進めていく。