

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、次世代エネルギーフロンティアを拓くコライダー実験の実現に向けた研究活動を行っている。

### ■ LHC 稼働状況

$\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$  での LHC の Run 3 運転は最終年(5年目)を迎えた。Run 3 の運転は 2026 年 6 月で終了することが決まっているため、2026 年の Run は例年よりかなり前倒して 2 月上旬からコミショニングを始めた。ALICE 近くの真空ペローズにリークが検出されたため、修理に 5 日間を費やしスケジュールに遅れが出たものの復旧し、3 月 7 日に 2026 年最初の stable beam が宣言された(図1)。pp 衝突は 6 月 20 日まで実施し ATLAS 実験としては  $28 \text{ fb}^{-1}$  を取得することを目標とする。その後 Pb-Pb 重イオン衝突を 3 週間弱行ったのち、 $2.3 \times 10^{11} \text{ ppb}$  (protons-per-bunch)の大強度テストを行い、6月29日からいよいよ HL-LHC アップグレードのため Long Shutdown 3 (LS3) に突入する予定である。

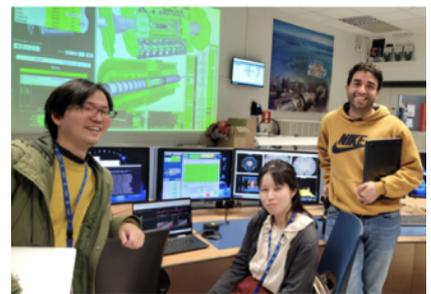


図1：2026年物理データ取得に向けて ATLAS ピクセル検出器のキャリブレーションに携わる ATLAS 日本グループの若手研究者たち。

遡って 2025 年の LHC データ取得はきわめて好調で、図2 に見るように  $125 \text{ fb}^{-1}$  の積分ルミノシティを供給ことに成功した。これは単年あたりの記録としては最高記録で、Run 3 全体では  $319 \text{ fb}^{-1}$  を記録した。

### ■ 2025年のATLAS運転状況

2025 年の ATLAS 検出器は非常に安定して運転され、データ取得効率は95%以上という高い水準を維持した(図3)。日本グループが担当するエンドキャップ・ミュオントリガー (TGC) および関連する Level-1トリガーも概ね安定に稼働した。運用上の進展として、2025 年 8 月にはそれまで不具合のため使用できていなかった New Small Wheel (NSW) の 1 セクターが復帰し、TGC-NSW 連携トリガーが全領域で運用可能となった。また 10 月には一時的にデータ量増加に

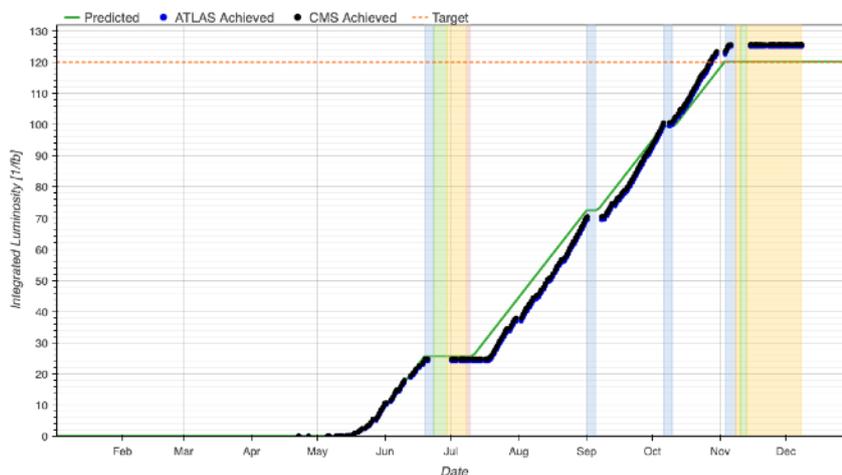


図2：2025 年の LHC 運転における計画と実績の比較。 <https://bpt.web.cern.ch/lhc/statistics/2025/>

起因する読み出しビジーが発生したが、エキスパートの対応により約30分で復旧し、同様の事象に迅速に対応できる運用手順も整備された。

装置面ではいくつかの機器トラブルが発生したものの、大きな運転影響には至らなかった。9月にはセクター A08 のしきい値電源が不安定となったが、既存設定のままで運転が可能でありデータ取得への影響はなかった。11月にはラックの冷却ファン故障が発生したが即日交換で対応し、その復旧過程で電源問題も解消した。また、高電圧モジュールの不具合については年末シャットダウン中に交換を行い、問題は解決している。

性能面では、TGC 起因のデータ取りこぼし (dead time) が年間を通して約 0.1% という低い水準を維持した点が特筆される。これは 2024 年に実施した運用改善の成果であり、現在は他の安定なサブ検出器と同等のレベルに達している。さらに安定運転のもとで装置性能の詳細な評価も進み、気圧変化に伴う検出効率のわずかな変動なども観測されたが、トリガー効率への影響は最大でも約 1% 程度にとどまることが確認された。

ピクセル検出器のデータ品質は極めて高く維持され、取得データの 99.9% が物理解析に使用可能であることが確認された。また、検出器の稼働率も引き続き高い水準に保たれており、最内層では 99%、その他の層では 93% のモジュールが稼働した。2025 年末時点での総放射線量は、最内層 (IBL) で  $2.8 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 、第2層 (B-Layer) で  $1.4 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  と見積もられている。設計値は、最内層で  $5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 、第2層で  $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  であり、特に第2層では設計想定を上回る領域に達している。このような状況のもと、較正や性能確認のためのモニタリング・データ取得を高頻度で実施することで、運転期間を通じて十分な性能を維持した。さらに、実データを用いた評価により、放射線による性能変化がシミュレーションとよく一致していることが確認されている。今後も継続的な性能監視が重要である。

ATLAS 実験の後段トリガーシステムについて、今年度の運転で安定して稼働・データ取得を行うことが出来た。EF グループでは、高速ミュオン飛跡再構成を行うトリガー、および飛跡再構成を行うトリガー、特に、長寿命新粒子など特殊な飛跡に基づく物理トリガーを開発・運用している。運転中はデータクオリティ・モニタリングなどを定期的に行い、高品質の安定したデータ取得を行った。高速ミュオン飛跡再構成トリガーでは、近接ミュオンに対して効率があまり出なかった原因を突き止め、修正を行って本年度のデータ取得を行った。取得した実データを用いて、実際に効率が上昇していることを確認した。

## ■ 2025年末シャットダウン期の準備

TGC 検出器では、2025 年初めからセクター C04 の高電圧モジュールに不安定性が見られていた。TS2 で配線の改善を試みたが解決には至らず、年末シャットダウン (YETS) 中にモジュールを交換した。交換後は問題は再発していない。2026 年 2 月に YETS が終了し、地下実験ホールの安全確保後に検出器ガスの循環を再開した。安定運転を確認した後に高電圧を立ち上げた際、別の高電圧モジュールが故障したが、アクセスが困難な場所での作業にもかかわらず交換を完了し、2026 年の物理ラン開始前に TGC を完全な状態に復帰させた。

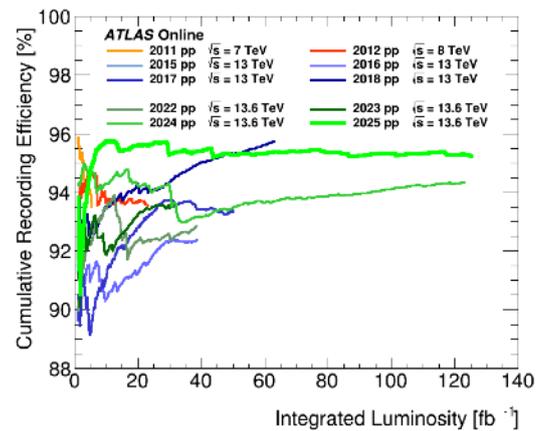


図3：年次ごとのATLASにおけるデータ取得効率を年初からの積分ミノシティの関数として比較したもの。2025年は当初から高い効率を示し、年間を通じて維持することができた。

ピクセル検出器ではシャットダウン期間を利用して、センサーの放射線損傷の評価と装置の保守作業を行った。読み出しドライバや光伝送系の部品交換、電源端子の修理などを実施するとともに、放射線損傷による性能低下を補償するためセンサーの動作電圧を引き上げた。また漏れ電流の増加を抑えるため一部層の冷却温度を低下させた。設定変更後も漏れ電流やノイズは許容範囲内にあり、2026年の運転に向けて安定に動作することを確認した。

さらに運転再開に向けた調整として、初期衝突データを用いてピクセル検出器のタイミング最適化を行い、全モジュールのビーム衝突時刻に対するずれを約 2 ns 以内に揃えた。加えて、高電圧条件を変えながら電荷収集効率を測定し、放射線損傷に伴う性能変化の評価も進めている。

## ■ ATLAS物理解析

物理解析については、Run 2  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  の  $140 \text{ fb}^{-1}$  を用いた解析論文が総計で 466 本を数え、 $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$  の Run 3 データを用い 26 本の論文を出版している。今回は ATLAS 日本グループとしても深くコミットしてきた超対称性粒子 (SUSY) の最新の探索結果を 2 本紹介する。SUSY の中でもヒッグス粒子の超対称パートナーであるヒグシーノは、ヒッグス粒子の質量の安定性を説明する可能性があるだけでなく、多くの理論では宇宙に残る暗黒物質の候補にもなる。そのため LHC 実験では重要な探索対象と位置づけられている。実際の観測では、ヒグシーノは「チャージーノ」や「ニュートラリーノ」と呼ばれる粒子として現れる。しかしこれらの粒子は生成確率が小さく、さらに質量差が小さい場合には崩壊生成物のエネルギーも低くなるため、測定器にとって捉えやすい信号として同定することが非常に難しい。特に質量差が数 GeV 以下の「縮退スペクトル」と呼ばれるパラメータ領域は、これまで探索が困難な領域として残されていた一方、グルイーノやウィーノの質量として換算すると非常に広い領域をカバーするという点で重要性が高いことが知られている。

ATLAS 実験では、LHC Run 2 (2015–2018) で取得した全データを用いて執拗にこの領域の探索を行ってきている。質量差の違いによって現れる実験シグネチャが大きく変わるため、今回の研究 [\[arXiv:2511.20042\]](https://arxiv.org/abs/2511.20042) では二つの独立した探索手法を用いた。一つは、チャージーノが数ミリメートル飛行した後に崩壊する場合に現れる「変位飛跡 (displaced track)」を探す手法であり、[2024年6月の活動報告](#) で紹介した Cut&Count による最初結果を機械学習を用いてさらに改善したものである。もう一つは、ニュートラリーノの崩壊によって生じる通常同定できる運動量しきい値よりも低い運動量の荷電レプトン対 ( $e^\pm, \mu^\pm$ ) のうち、最低 1 本はレプトン同定できたケースを利用する「1レプトン+1荷電粒子」事象の探索である。いずれの解析でも機械学習を用いた新しい信号識別手法を導入し、極めて低運動量の粒子や特徴的な飛跡構造を効率よく識別できるようにした点に大きな特徴がある。

さらに ATLAS では、チャージーノが短い距離だけ飛行して崩壊する場合に現れる「消失飛跡 (disappearing track)」の探索解析のアップデート [\[arXiv:2603.08315\]](https://arxiv.org/abs/2603.08315) も行った。この場合、チャージーノは検出器内部で非常に短い飛跡を残した後、ほとんど観測できない粒子へ崩壊する。そこで通常より少ない検出器ヒットだけから飛跡を再構成する新しいアルゴリズムを開発し、さらに機械学習を用いて非常に低エネルギーの  $\pi^\pm$  中間子を識別することで、この特徴的な事象を探索した。

解析の結果、いずれの探索でも標準模型を超える有意な信号は観測されなかった。しかし得られたデータから、ヒグシーノに由来するチャージーノ・ニュートラリーノの質量に対してこれまでで最も強い制限を与えることができた。例えば、質量差が約 1–2 GeV の領域ではチャージーノ質

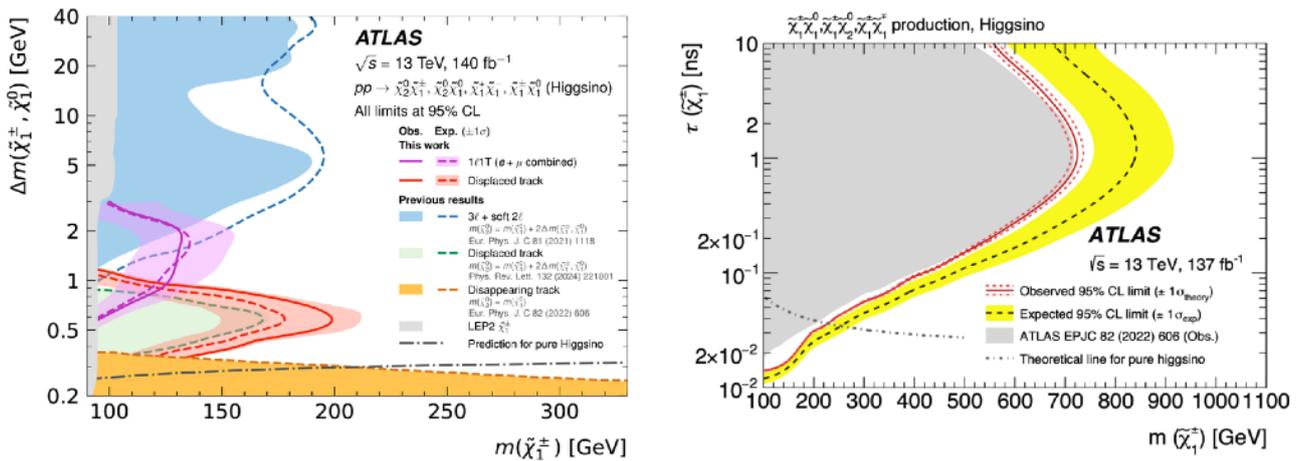


図4：（左）縮退領域におけるヒグシーノの探索状況。  $\Delta m = 1\text{--}2$  GeV 付近の「1レプトン+1荷電粒子」が新しい手法で、Displaced TrackはCut & Countでの結果を機械学習によりエンハンスした結果である。（右）縮退が最も強い場合に有効な「消失飛跡」を用いた最新の探索結果。

量約 130 GeV までの領域を排除し、より小さい質量差の場合には約 200 GeV 近くまで感度を拡張した。消失飛跡の場合は理論上最も縮退が強いケースに対し、255 GeV まで排除した (図4)。

今回の研究では、他の解析でも目覚ましい成果を挙げている機械学習を活用した低エネルギー粒子の識別や短い飛跡再構成など、新しい解析技術が大きな役割を果たした。現在進行中の Run 3 データの解析では、より大きな統計量と改良された手法を用いることで、これらの探索感度をさらに高めることが期待されている。ヒグシーノや関連する超対称粒子の探索は、引き続き標準模型を超える新しい物理の発見に向けた重要な研究テーマである。

## ■ HL-LHC 向けアップグレード

Long Shutdown-3 (LS3) 開始を控え、HL-LHC 向けアップグレードは佳境を迎えている。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。うちストリップセンサーは、日本担当分の量産を完了済みで、海外においてモジュール化が進行している。一方ピクセル検出器に関しては、センサーの量産を終え、2025 年初頭からモジュール実機の本量産を進めている。前回報告 (2025 年 7 月) 以降の進捗として、1 日あたりのアセンブリ数 7 モジュールを実現し、継続的に量産を進めている。

日本で生産・試験されたモジュールのうち最初のロットについてはイタリアのエンドキャップ構造体への搭載サイトに到着した。夏の時点で課題になっていたこととして、歩留まりを下げると見られているバンプ・ボンディング時にダストがセンサー-ASIC 間に挟まることによるフロントエンド回路故障の発生確率の低減といった課題があった。これについてダストの組成や形状などを追跡した結果、フロントエンド ASIC をウェファーからダイシングしてピックアップする際に、ダイシングで生じる破片がウェファー上に混入ことが主な原因である可能性があることが判明した。そこでピックアップ工程を行うハンドリング企業の協力のもと、この破片が混入する確率を減らすためのダイシングテープの冗長な張替え、およびウェファーのスピニング洗浄の徹底を施したところ、フロントエンド回路故障の発生確率を劇的に改善することができた。

この新しい取り扱いを導入して以後のモジュール歩留まりは計画当初の歩留まりの見込みを満足するもので、この意味でモジュール量産を軌道に乗せることができたと考えられている。累計で 1,400 枚以上のアセンブリを実施しており、ピクセル・モジュールの量産は 2026 年度を通じて最大レートで継続する見込みである。現在は上述の問題以外に生じる低頻度の問題の追跡や、コラ

ポレーションとして量産前に定義した品質評価試験メニューを実情にあわせて合理化する取り組みを進めており、結果としてさらに安定的に高い生産レートを達成する余地を作ろうとしている。

一方メジャーな構造体への統合サイトである CERN で、日本グループとしての活動を徐々に展開しつつある。具体的には日本で生産したモジュールを搭載する Loaded Local Support と呼ばれる構造体の品質評価試験システムの開発や、今後統合的に測定器を運用するためのオーケストレーションされたモジュール群のキャリブレーションを行うための DAQ ソフトウェアフレームワークの開発などに日本グループとして着手を始めている。3月初旬の日本シリコングループのワークショップでは、これらのアクティビティの今後の方向性について突っ込んだ議論を行った。

HL-LHC へ向けて、増大する信号量に対応するため ATLAS 実験の後段トリガーシステムでもアップグレードを進めている。中でも特に計算機資源を必要とするのが飛跡再構成であるため、計算機資源の増加を抑制しつつも高効率かつ高速な飛跡再構成を目指して大幅なアップグレード開発を進めている。ATLAS 実験では、従来の CPU での再構成の改良システムに加え、FPGA や GPU といった汎用アクセラレータを使用する新規の飛跡再構成システムの開発を並行して進めている。EF グループでは、GPU による並列計算を用いた飛跡再構成手法の開発を行っている。GPU では費用と速度の観点から単精度での計算が標準的であるが、Kalman Filter による飛跡フィットにおいて、単精度計算では計算精度からフィットを失敗する割合が多いことがわかった。このため、改良された Kalman Filter の計算手法を導入した。また ITk 検出器での運用に向け、設定パラメータの最適化を進めた。CPU/GPU/FPGA を用いたそれぞれの飛跡再構成手法について、2025年末に ATLAS 実験内部資料が出揃い、システム決定に向け検討が進められている。

エンドキャップ部ミュオントリガー TGC のアップグレードでは、約32万チャンネルの信号を処理するため、検出器近傍に設置する前段回路約 1,500 枚と、トリガー判定・データ読み出しを行うトリガープロセッサボード約 100 枚を導入する。TGC は LS3 開始直後の最初の半年間で前段回路を設置する必要がある。作業遅延は後続のアップグレード工程全体に影響する。そのため機器は 2025 年夏に KEK から CERN へ輸送し、到着後の検査で輸送による故障がないことを確認した。設置作業の一部として、光ファイバー配線の敷設を前倒しで開始し、年末年始の停止期間中に全体の約 75% を完了した。この作業は LS3 本番に向けた実地訓練としても位置付けられ、作業手順や人員配置の最適化に役立てられている。また光通信では信号到着タイミングの揃え込みが重要であるため、事前にファイバー長を測定し、到達時間差を補正する遅延パラメータを決定した。

さらに前段回路1台を実際の設置位置に取り付け、Run 3 運転中の放射線環境下で動作試験を行った。放射線により FPGA 内部の状態が一時的に変化する Single-Event Upset (SEU) の発生率を測定し、設計時の見積もりと整合することを確認した。FPGA は自動修正機能を備えてお

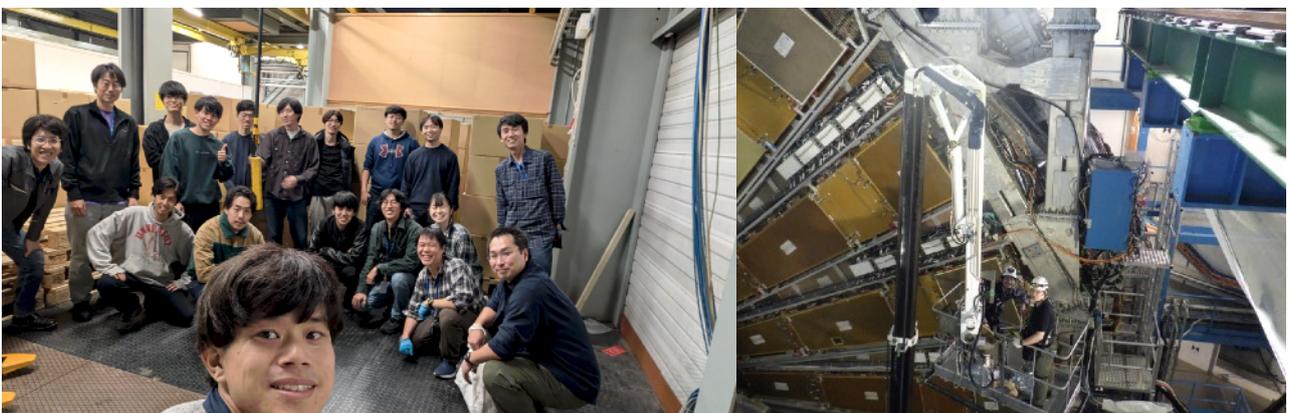


図5：（左）CERNに輸送された TGC フロントエンドボードのレセプションを終えた日本グループ。（右）HL-LHC アップグレードに用いる光ファイバー配線敷設作業の様子。

り、修正不能な場合には自動再起動する復旧機構も組み込まれている。試験を通じて改善点を洗い出し、より堅牢な自動復旧システムを構築した。

後段のトリガープロセッサボード (Sector Logic) では、最終設計レビューを通過した第2試作機を用いたファームウェア開発と統合試験が進められている。HL-LHC における ATLAS 標準の汎用読み出しデバイス FELIX との接続に成功し、KEK のテストベンチ上で前段回路からの模擬信号生成、光通信によるデータ転送、トリガー回路内での飛跡再構成、結果の読み出しまで一連の処理を確認した。今後は内部検出器の情報も組み合わせ、より精度の高いトリガー判断を行う仕組みの開発を進める。また、LHC と同期する基準クロックの配布方式を再検討し、トリガー動作の安定化に向けた改良と検証を行っている。

Sector Logic については第2試作機に対して細かい改善を施した最終試作機が製造中である。動作試験と設計確認を経て、来年度には量産試作の段階へ進む計画であり、同時に電源等の調達も進めていく予定である。

## ■ ヒッグスファクトリーと将来コライダーを見据えたR&D

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フロンティア・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。ILC-Japan 測定器ワーキングタスクフォースでは次世代  $e^+e^-$  コライダー向け測定器について包括的な議論を行った。事象レートが十分に低い  $ZH$  またはより高エネルギーでのデータ取得を前提に検討が進められてきたリニアコライダー向け測定器の  $Z$ -pole での運転まで含めた測定器環境への適用性や、PID 測定器の取り扱いも含め、広くヒッグスファクトリーが実現した場合に日本として主軸に据えるべき測定器コンセプトを議論しており、昨年8月にワークショップを東大で開催し、広く今後の測定器開発のあり方を議論した。これらの検討・研究の議論は JAHEP 将来計画委員会における「ヒッグスファクトリー班」や「検出器班」にも反映され、9月のタウンホールミーティングを経て、European Strategy Update 2026 に対する日本としての最終インプットの改訂・取りまとめに寄与した。関連して、ILD 測定器を ILC と FCC-ee 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、FCC  $Z$ -pole における TPC 飛跡測定器のレート耐性を調べるためにシンクロトロン放射や入射に関連する背景事象などをシミュレーションに実装しているほか、 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  過程における量子トモグラフィ効果をヒッグスファクトリーで観測するための測定器要求を研究している。

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 (MAPS) 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、さらには新奇半導体 CIGS の開発を進めている。

ITDC と協力して進めている MAPS 開発については、3層の MALTA2 テレスコープを組み立て、98%以上の検出効率を確立した。CERN を通じて CASSIA プロジェクトでのゲイン層をもつ MAPS について開発参加を進めている。関連して東北大学 RARiS を用いた照射試験、MALTA、LGAD および ITkPix を対象とした AR テストビームラインでのビームタイム、Fermilab での日米タイミング測定器ワークショップ、大阪大学でのタイミング検出器の研究会などを実施しており、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 に参加している。AC-LGAD センサの放射線耐性を高めるために、酸素ドーピングや炭素ドーピングによる

耐性の変化を研究していて、炭素ドープを行ったサンプルは顕著な放射線耐性の改善が見られた。酸素ドープでは変化が見られなかったため、BiO<sub>i</sub>系はドナーとしての酸素はアクセプタ除去のメインファクターになっておらず、BiB系の方がより重要であることが分かってきた。CIGSの開発についてはアクティブ層の厚みを増した25 μm厚のセンサー・サンプルを製造し、性能評価の途上にある。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にコミットしている。

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」[\[Webページ\]](#)がR6～R12年度で採択された（KEK・筑波大学・東京大学・名古屋大学・大阪大学）。若手の中長期海外派遣のために2つのプログラムが準備されており、物理部門，超伝導磁石部門，MAPSとAIエレキを中心とした検出器部門の3つの部門を中核とした次世代ヒッグスファクトリーのための先端技術に挑む「コース1」と、国際的な研究環境の中で切磋琢磨し、実験の推進力や多国籍の組織をリードする経験や人脈構築を通じて真に国際的な若手研究者を要請する「コース2」の両軸で若手研究者を海外研究機関に派遣するという設計で本格的運用を1年間行った。R7年度を通じてのべ3回の公募を実施し、「コース1」についてPD2名，PhD5名の派遣を、「コース2」についてPD3名，PhD17名の中長期派遣を，それぞれ実施した。来年度の第1回公募の採択も終了しており，今後もある程度安定的に派遣が実施できる見通しである。また測定器開発センターが夏に主宰したMAPSアカデミーや，12月に大阪で開催したテラスケール・ワークショップなど，広くエネルギーフロンティア実験を盛り上げるための活動も展開・支援している。

## ■ 受賞報告

- ・2025年8月にEFグループ博士研究員の須江祐貴氏が Lepton Photon 2025 国際会議にて “Enhancing the ATLAS Level-1 endcap muon trigger with New Small Wheel integration in Run 3” というタイトルのポスターを発表し，ポスター賞を受賞しました。