

目指している物理課題の近い素核研 ATLAS グループと ILC グループが合流し、新たにエネルギーフロンティア (EF) グループを発足した。EF グループが新しく取り組もうと考えている将来のエネルギーフロンティア実験に向けた物理、技術開発の検討を行いながら、LHC Run 3 実験に向けた準備、HL-LHC に向けた検出器の量産、ILC に関する国内外の動きに合わせた活動を継続している。それぞれに関する活動報告を以下にまとめる。

### 素核研 EF グループの発足

EF グループは、LHC およびその高輝度化 (HL-LHC) 実験を成功に導く活動を最優先にしつつも、ILC をはじめとする将来のエネルギーフロンティア実験を見据えた物理と最先端の検出器開発を推進する。EF グループが中心となって、コミュニティと連携しながら将来のエネルギーフロンティア実験を提案するコアグループを形成したいと考えている。EF グループが中心になって新しく進める具体的な研究内容に関しては検討しているところではあるが、素核研 ATLAS グループの研究者の専門性と KEK という研究所の特徴を活かし、時間分解能にも優れる半導体検出器 (LGAD センサーや SiGe BiCMOS monolithic など) の開発、機械学習技術の高エネルギー実験研究への応用、新しいエレクトロニクス技術の開発、高磁場磁石の開発などを軸にすることを考えている。これらの取り組みを、KEK 内外の様々な研究背景を持つより多くの研究者と共同開発ができるような仕組みを構築しているところである (Figure 1)。例えば、半導体検出器の開発は、EF グループで閉じずに、本年度新しく発足した素核研 測定器開発センターで様々な研究者と共同開発したいと考えている。同様に、機械学習とエレクトロニクスは、素核研の他グループの研究者と協力して立ち上げている AI フォーラムとコライダーエレクトロニクスフォーラムをそれぞれ活用して、広くコミュニティの研究者と研究を進める。高磁場磁石開発では、素核研低温グループや KEK 共通基盤研究施設 超伝導低温工学センターと相談しながら、将来実験に必要不可欠となる高磁場磁石の開発を大学の研究者たちと共に進める場を構築しようと考えている。今後の活動報告の中で具体的な研究成果を発信したい。

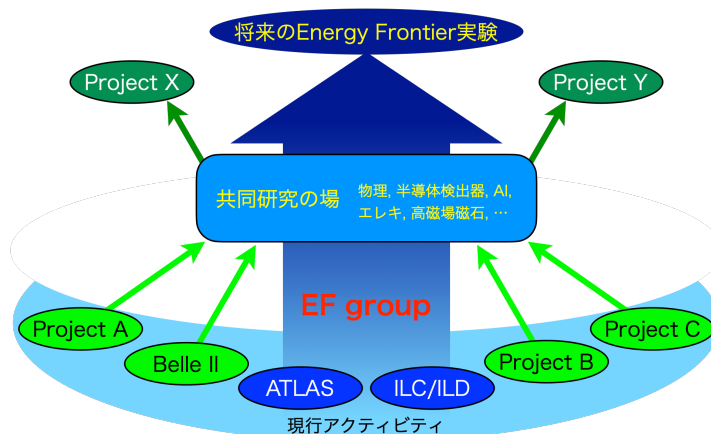


Figure 1: EF グループの概念図

### LHC Run 3 実験開始に向けた準備

LHC 実験は、加速器と検出器の比較的大掛かりなアップグレードを目的として、2019 年から長

期間のシャットダウンをしているが、2022 年の夏より Run 3 実験としてデータ収集が再開される。Run 3 実験の陽子陽子衝突エネルギーは 13.6 TeV の予定で、2025 年末までに  $290 \text{ fb}^{-1}$  の積分ルミノシティを蓄積する予定である。ATLAS 検出器では、カロリメータのエレクトロニクスの刷新、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を MicroMegas と small-strip Thin Gap Chamber からなる新しい New Small Wheel (NSW) に交換するなどのアップグレードを進めてきた。すでに実験ホールは閉じられ、物理ランに向けた準備を着々と進めている所である。Run 3 実験で得られる多量のデータによる物理解析からヒッグス粒子の  $\mu$  粒子対崩壊の発見などの物理成果が期待できるので、新規導入の検出器はもちろん、これまでも活躍してきた検出器の早期立ち上げも重要課題となる。KEK 素核研 ATLAS グループは、荷電粒子運動量の精密測定、 $b$  クォーク同定やタウ粒子同定などで特に重要なシリコンピクセル検出器、高運動量ミュオンを捉えることでヒッグス粒子生成事象などの興味のある物理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において Run 3 実験開始に向けた準備を進めてきた。

シリコンピクセル検出器において、すでに過酷な放射線環境下で十分な性能を発揮してきた検出器を Run 3 期間中においてもこれまでと同等以上の性能を発揮するかが鍵となる。KEK 素核研 ATLAS グループは、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の交換、長期安定運転に不可欠な冷却システムの更新など、ハードウェアの観点などのできる限りの更新を進めた。さらには、ソフトウェアの観点からもデータの質を保証するモニタリングを日本グループが主導している。例えば、欠陥のあるピクセルモジュールがある領域を判断する指標として、これまでは陽子陽子衝突点分解能を用いてきたが、より物理のパフォーマンスにより直結する  $b$  クォーク同定の性能 (70% の同定効率時の誤識別率) に変更した。その他、ローレンツ角、クラスター形状、エネルギー欠損などの検出器応答の基本的なパラメータの観点からもピクセルモジュールが正常に動作し、Run 3 実験においても重要な物理成果を出すことができる状態か判断できるようにした。これらの研究は、早稲田大学、東京工業大学、お茶の水大学、大阪大学、九州大学などの学生・スタッフと共に進めた。

初段ミュオントリガーでは、両エンドキャップ部の NSW が ATLAS 実験ホールにインストールされたことに伴い、その新しい検出器情報も組み込んだトリガーアルゴリズムを実現するための全く新しい初段エンドキャップミュオントリガーのエレクトロニクスの開発、量産、インストールを ATLAS 日本グループが主導した (Figure 2)。新型コロナウイルス感染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を完了させ、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の準備を進めてきたが、Run 3 の開始を間近に控えたことで必要な研究者の渡航を許してもらい、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ショニングを進めている。NSW だけでなく、Resistive Plate Chamber (RPC)  $\mu$  粒子検出器や全ミュオントリガーを取りまとめる中央プロセッサなども新しく導入されるために、それらとの接続、同期試験、および、統合コミショニングを急ピッチで進めている。



**Figure 2: NSW のインストール時の状況（左）とインストールに伴うミュオントリガーエレクトロニクス周りの接続・同期試験の様子（右）。**

高度な事象分別を行うハイレベルトリガーは、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メニューに導入し、その動作検証試験を進めている。

### HL-LHC に向けて

高輝度 LHC (HL-LHC) 実験に向けたスケジュールが刷新され、Run 3 実験を 2025 年まで続け、2026 年から 2028 年に HL-LHC 実験のための長期シャットダウンを実施し、2029 年から HL-LHC 実験を開始することになった。HL-LHC 実験では、LHC 実験のビーム輝度を 10 倍に上げることで、新粒子の探索領域を拡大させるとともに、多量なヒッグス粒子を用いて、ヒッグス自己結合など、ヒッグス粒子の重要な性質を徹底検証して標準模型を超える新しい物理を見出す。一方で、一度の陽子ビーム交差の中で起こる平均衝突反応（パイルアップ）数も、現在の約 35 から 200 程度にまで増え、そうした実験環境下においても荷電粒子の飛跡を精密に再構成するシリコンピクセル検出器とシリコンストリップ検出器からなる内部飛跡検出器の刷新と、低運動量の QCD 事象だけで構成されるような事象を排除しつつ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トリガーとデータ収集系のアップグレードが鍵を握る。KEK 素核研 ATLAS グループは、内部飛跡検出器（ストリップ検出器、ピクセル検出器の両方）とエンドキャップ部のミュオントリガーの開発を主導している。

ストリップ検出器とピクセル検出器は、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。ストリップ検出器は、初期量産品に対して電流-電圧測定やたわみ検査などの

品質測定の観点から量産開始が認められ、2021 年度中に 1,784 枚のセンサーを量産し、それらの品質測定も完了した。数年にかけて合計で 6,350 枚のセンサーの量産と品質測定を完了させる。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、その初期量産のために使用するセンサーを 124 枚製作した (Figure 3 左)。さらに、モジュールの初期量産を開始し、10 年間の運用で 100 回程度の熱サイクルを想定した温度サイクル検査を実施し、モジュールをパリレンで包むことでバンプ剥がれの危険を軽減できることを指摘するなど、モジュール製作過程の最終調整を急ピッチで進めている (Figure 3 右)。

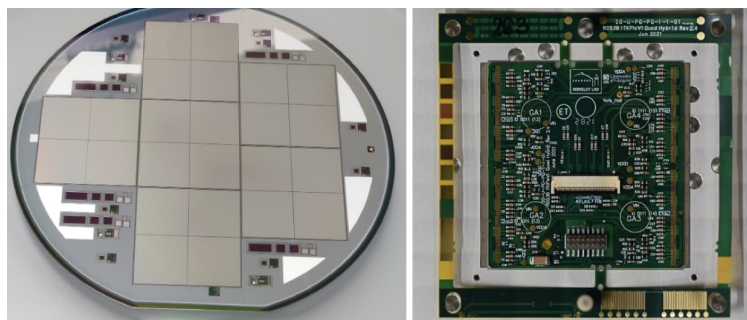


Figure 3: ピクセルセンサー (左) とピクセルモジュール (右)。

エンドキャップ部のミュオントリガーでは、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オンの存在する事象を効率よく選別するミュオントリガーの開発を進めている。そのために、エンドキャップ部のミュオン検出器である Thin Gap Chamber (TGC) から来る 256 チャンネルのヒット情報の同期をとって陽子陽子衝突から派生したミュオンか同定する ASIC、その検出器情報を 16 ギガビット毎秒で転送する FPGA、2 対の光トランシーバなどを搭載した PS ボード、放射線環境下に曝される PS ボードの FPGA を監視・制御する JATHub ボード、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オン飛跡の再構成を行うトリガー・読み出しプロセッサーボードの開発を進めてきた。PS ボードに関しては、1,600 枚のボードの量産準備を進めている所であるが、半導体素子の不足、新型コロナウイルスの影響による物流の遅延などの影響によって集積回路素子の値段高騰、納期長期化で苦労している。2021 年度時点で、2、3 種類の素子の納期が 1 年を超えており、その調達方法をどうするか頭を悩ましているが、今の所大きな遅延はなく量産の準備を進めている。主に東京大学で開発と量産を進めていった JATHub ボードは、160 枚の量産を完了させ、その品質検査準備に取り掛かっている。トリガープロセッサーボード (Figure 4) は、最初の試作ボードの製作と動作試験を進め、トリガーと読み出しに特に重要となる主な機

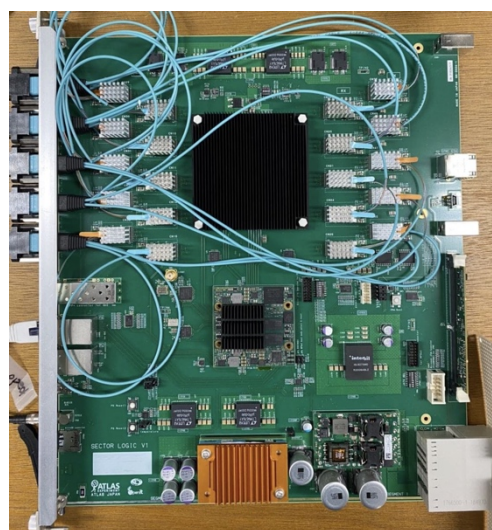


Figure 4: トリガープロセッサーボード。

能が予想通り稼働することを確認し、より安定動作するための修正箇所を割り出した。

### ILCに関する国内外の動向に合わせた活動

KEK 素核研 ILC グループの主な活動内容は、2022 年 1 月の活動報告にまとまっている[1]。その活動報告後の世界の動向として、2022 年 3 月 29 日, 30 日の ICFA 会議において、ILC 国際推進チーム(IDT)の継続が承認された。詳しくは、4 月 12 日に公表された ICFA 声明[2]を参照していただきたい。

KEK 素核研 ILC グループの研究で特に進展があった内容として、1 月の活動報告に研究内容の詳細が記載されているが、 $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$  のシミュレーション研究と TPC 検出器のビーム試験データ解析と陽イオンゲート付き位置分解能の最終結果、および、 $e^+e^- \rightarrow \gamma H$  のシミュレーション研究で 2 名の総研大生が博士号を取得した。これらの研究を含む研究内容をまとめ、スノーマス研究として 6 編の White Paper を出した。

### **参考文献**

[1] 2022 年 1 月の活動報告:ILC グループ <https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2022/01-2/>

[2] ICFA Statement Regarding Higgs Factory Development and the ILC”,  
[https://icfa.hep.net/wp-content/uploads/ICFA\\_Statement\\_April2022\\_Final.pdf](https://icfa.hep.net/wp-content/uploads/ICFA_Statement_April2022_Final.pdf)