

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06927

研究課題名（和文）LHC-ATLAS実験におけるタウ粒子を用いたレプトンフレーバー非保存崩壊の探索

研究課題名（英文）Search for lepton-flavor-violating decay of tau lepton at the LHC-ATLAS experiment

研究代表者

小林 大（Kobayashi, Dai）

九州大学・理学研究院・学術研究員

研究者番号：30805403

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、特にLHCの高輝度化計画に向けた検出器のアップグレードに注力した。高輝度化に伴い、粒子密度や放射線によるダメージが増加するため、最内層のシリコン飛跡検出器は総入れ替えが必要となる。その検出器モジュールの量産のため、部材の耐久性や基礎的な設計から、その製造手法について研究を行った。センサーと基板の接着やワイヤボンド、その封止など基礎的な技術開発を終え、研究室での組み立てを可能にした。現時点で、グループ全体でのスタンダードとなる手法を開発し、試験的なモジュール量産を行う段階にこぎつけた。今後はプリプロダクションに向けて、簡便性などに着目して更に洗練し、実機の生産につなげていく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理学における標準模型には、未だ記述できない物理事象が存在することがいくつもの実験で示唆されている。その解明は人類の英知として大変重要なことである。高エネルギー加速器実験における探索は最も直接的にアプローチできるものであり、LHCの高輝度化計画は現在最も期待の大きい実験である。これを成功に導き、最高のパフォーマンスでデータを解析するためには、検出器の高精度かつ安定した性能が不可欠である。本研究は検出器の置かれる過酷な環境、及び性能に対する要求を鑑みて、検出器モジュールの安定性や性能を高く保つことを目的としており、期待される発見に大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：In this period, I researched for the detector upgrade toward high luminosity LHC program. The pixel detector, which is located at the innermost layer, is necessary to be updated due to higher radiation damage and particle multiplicity. I developed the mass production procedure, including the material tolerances and module layout design. Now, developed procedures were certified by the test production and recognized as the standard method in the group. This method will be brushed up through the pre-production phase, and used in the mass production phase in the whole production sites.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：素粒子物理学 高エネルギー実験 シリコン検出器 新粒子探索

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究開始時の状況として、まず、スイス・ジュネーブで行われているハドロン衝突型大型加速器を用いた LHC-ATLAS 実験は第二期運転の終盤に差し掛かっていた。更に、その後継実験である高輝度化計画、HL-LHC(High Luminosity LHC)を 2026 年から開始することを予定していた。この計画では、より大統計の陽子陽子衝突のデータを利用することで、素粒子標準模型を超えた物理の発見を目指している。特に、分岐比の小さい信号や生成断面積の小さい粒子に対しては大きく感度が向上することが期待される。一方で、検出器はその放射線環境の激化、及び粒子数の増加などに対応するため、改良が必要であった。特に、内部飛跡検出器は現行の検出器のものを総入れ替える必要があり、新たな検出器の制作が必要であった。これらはシリコン半導体をセンサーとする高位置分解能検出器であるが、それを大面積かつ多層に設置するため、10000 を超える数のモジュールを量産する必要がある。この製造工程確立は急務であり、2021 年の製造開始に向けて本格的に開発及び確立を進めていかなくてはならない状況であった。

### 2. 研究の目的

大きな目標は、HL-LHC でのデータを用いての長寿命となる新粒子の探索、及び発見である。これは現行実験でも生成されうる事象であるが、生成断面積の小さいことから、現在のデータ量では有意に観測することは難しい。そのために、高輝度化計画の実現、及びそのデータを用いた解析が必要不可欠である。しかし、本研究期間ではこの高輝度計画は準備期間であるため、検出器のアップグレードに重きを置くこととした。

内部飛跡検出器の中でも最内層に位置するピクセル検出器は、ピクセル状に配置された極小のセンサーで構成される検出器であり、衝突点に最も近いことから分解能や放射線耐性には最も強い要求が課せられる。高輝度化に向けてすべての検出器を入れ替える予定であるが、その際にはこれらの要求を満たした検出器モジュールを量産しなければならない。150  $\mu\text{m}$  厚のシリコンで構成されるこの検出器は非常にデリケートであると同時に、性能を引き出すためには高い精度での組み立てが要求される。それは研究機関で分担して組み上げる予定となっているため、その手法は安定性と簡便性、精度が保証されたものでなければならない。本研究ではこの手法を先導して開発、確立することを目指した。

### 3. 研究の方法

図 1 に示すように検出器を組み立てる工程は、センサーと集積回路(ASIC)がフリップチップされたものに薄いフレキシブル基板(FPC)を接着するところから始まる。更に、ASIC の排熱のために接着後はアルミワイヤーによって ASIC と FPC を結線し、それを樹脂によって封止する。更に放電防止用の薄膜蒸着を施し、品質試験の後にモジュールとしては完成となる。ワイヤー結線後は、品質試験以外にも動作試験を行うなどして、各工程での損傷などについても調べながら、高収率を維持する必要がある。本研究では、この全行程を位置から考え、構築していく必要があった。まず接着の繰り返し位置精度を 50  $\mu\text{m}$  以内に抑え、その操作を簡易化するために、専用の治具と接着剤の塗布器具を設計、制作した。更に、自動ボンダーでのワイヤーボンディングのための調整を行うとともに、その封止の手法として、塗布ロボットを利用した手法を開発した。動作試験においても、ベータ線源を利用することで全ピクセルの応答を確認する手法を策定することとした。これらの手法をすべて機能するようにし、研究室で複数のモジュールを連続で組み立てるデモンストレーションを行い、その基礎を確立するというアプローチを取った。同時に、接着や封止に用いる樹脂に対しては、実験環境で予想される熱サイクルと放射線に対する耐性を調査し、その選定も行った。特に放射線耐性については、東北大学 CYRIC の協力を得て陽子線照射を行うことで、結果を得ることとした。

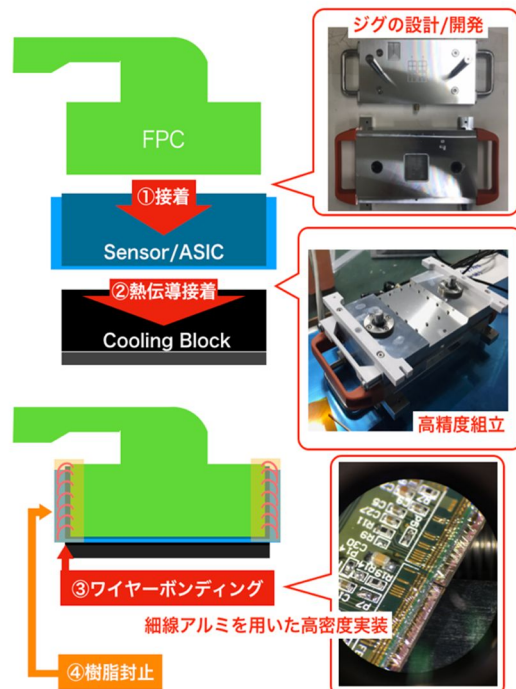


図 1. 工程の全容と、各工程での開発要素の概要。

### 4. 研究成果

前項で示した項目についてはすべて達成し、2018 年度の日本物理学会年次大会で示したとおり、試験的に 19 個のモジュールを組み立てることに成功している。接着においては繰り返し位置精度 30  $\mu\text{m}$  を達成し、接着剤の塗布においてはステンシル法を用いることで塗布量精度 3%以内を達成している。ワイヤーボンドとその封止に対しては、一つも損傷することなくその工程を達成

することができている。これらの性能はベータ線源を利用して全ピクセルの信号を読み出すことによって、各ピクセルのレベルでの検証を可能にした。結果として、工程として問題なく組み立てられるということを示し、現在 ATLAS グループでもベースラインとなるなど、実験全体を推進するという意味でも先導的な役割を果たした。部材の選定においては、CYRIC での 3 度に渡る照射試験を通して、これまでも実績もある Araldite2011 がこの放射線条件でも耐えうることが保証された。しかし一方で、封止材については各々の試験には耐えるものの、放射線照射後の熱サイクルでのワイヤー損傷が見られるなど、未だに素材の決定に至っていない。今後は現状最も耐性が良かったものに対してフィラーを混ぜるなどして改善を図る。それについては今後の課題として残る形となったが、工程としては素材の変更にも対応できるような余地を残しているため、概ね手法としては確立できたと言える。今後はこの研究を基礎としてプリプロダクションを経て改良し、実機の量産へと進む予定である。

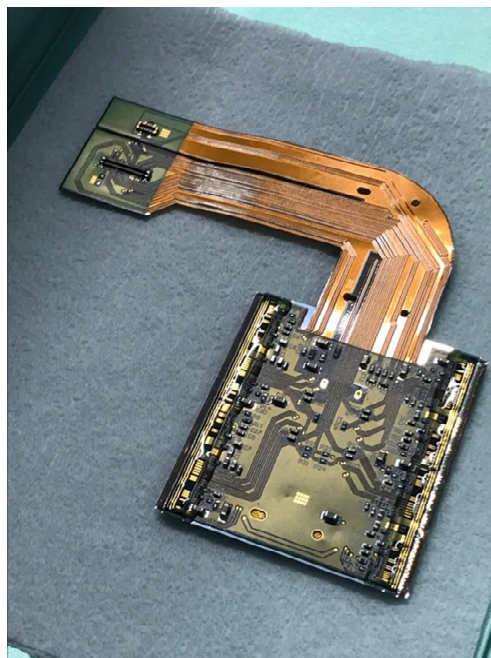


図 2. 組み立てたモジュールの外観。  
19 モジュールに対して封止までを完了し、読み出し試験を完了した後出荷した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

(国内学会)

“LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器量産工程の構築”, 小林 大, Jocsan Hernandez, 高嶋 隆一, 東城 順治, 外川 学, 花垣 和則, 藤野 主一, 古市 歩, 宮崎 祐太, 山口 尚輝, 山下 将暉, 彌吉 拓哉, 他 ATLAS 日本シリコングループ, 2018 年度日本物理学会年次大会, 九州大学, 2019 年 3 月

“LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器組み立て工程における接着精度評価”, 小林 大, Jocsan Hernandez, 高嶋 隆一, 東城 順治, 外川 学, 花垣 和則, 藤野 主一, 古市 歩, 宮崎 祐太, 山口 尚輝, 山下 将暉, 彌吉 拓哉, 2018 年度日本物理学会秋季大会, 信州大学, 2018 年 9 月

“LHC の高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組み立て工程の開発”, 小林 大, 家田 晋輔, 高嶋 隆一, 東城 順治, 外川 学, 花垣 和則, 藤野 主一, 山口 尚輝, 他 ATLAS 日本シリコングループ  
2017 年度日本物理学会年次大会, 東京理科大学, 2018 年 3 月

(国際学会)

“Module Development for the Phase-2 ATLAS ITk Pixel Upgrade”, Dai Kobayashi, PIXEL2018(Poster), Academia Sinica(Taiwan), 2018 年 2 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。