

令和元年6月7日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05386

研究課題名（和文）運転現場におけるシリコン半導体飛跡検出器の放射線損傷に関する系統的研究

研究課題名（英文）Systematic study on the radiation damage of silicon semiconductor tracking detectors at operating site

研究代表者

近藤 敬比古（kondo, takahiko）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：30150006

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：スイスのCERN研究所ではLHC加速器を使って陽子衝突現象の中から新粒子や新現象を観測する実験を行ってきた。2012年にはヒッグス粒子が発見された。アトラス実験装置の中心部に設置された4000台のストリップ型シリコン半導体検出器は放射線のため性能が変わる。この放射線損傷の進行具合を継続モニターし運転条件の最適化を図ってきた。検出器のリーク電流の経年変化はほぼ予想どおりに進行していることがわかった。全空乏化電圧は測定が難しかったが、各種観測結果は予想より速く進行しているようだ。2023年までの運転状態を予想した結果によると運転に大きな支障がないことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1990年代にほぼ確立したシリコン半導体検出器の放射線損傷モデルは、少量サンプルを強いビームで短期間に行ったテーブルトップ実験に基づいている。放射線損傷のアニーリングなどはセンサー温度を上げて加速させた結果によるものである。本研究はそれとは対照的に、4千台という多数の実機で、10年以上の長期にわたって、単位時間当たりの放射線量は低い状態で、放射線損傷の進行具合を測定し放射線損傷モデルとの詳細な比較を行った。経験した研究法と、放射線損傷モデルの有効性の検証は、将来より強い放射線環境下で使われるコライダー実験の検出器の設計や運転に有意義なインプットとなり、重要な素粒子実験技術を発展させる。

研究成果の概要（英文）：Using the LHC accelerator at CERN in Switzerland, physics experiments to search new particles and phenomena have been performed. Higgs particles were discovered in 2012. 4000 modules of silicon semiconductor tracking detectors installed at the center of the ATLAS Experiment are subject to changes of their performance due to radiation damages. We have been continuously monitoring the changes due to radiation to optimize the operational conditions. The evolution of the leakage current turned out to agree with model predictions. It has been quite difficult to measure the full depletion voltage. Various observation indicated the full depletion voltage changed faster than the model expectation. There seems to be no strong issues expected in safe operation up to the end of 2023.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子物理実験装置 シリコン半導体飛跡検出器 放射線損傷 ヒッグス粒子探索

1. 研究開始当初の背景

2012年7月にCERN(欧州原子核研究機構)のLHCコライダーを使った実験によって、素粒子の標準模型の最後のピースであるヒッグス粒子が発見された。ヒッグス粒子の精密研究と標準模型を超える新物理の探求は今後の素粒子物理学の最重要課題である。このためにはエネルギー13兆eV、輝度が $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の環境の下で陽子・陽子衝突から発生する2次粒子の方向と運動量を高精度・高効率で測定する必要がある。

それらの実験装置では衝突点近くの荷電粒子の飛跡を測定する検出器は、高純度のシリコン半導体結晶を用いたプレーナ型PN-junction検出器である。検出器はシリコン結晶のウェーファー部分(以下センサーと呼ぶ)と微小信号を読む電子回路から構成される。1990年代にこのセンサーの耐放射線性の研究が進んだ。

これらシリコン検出器はコライダー実験で発生する二次粒子により積算1MRad以上の放射線を浴びる。設置した検出器群の正常な運転を維持するためには、それらの放射線損傷を常時モニターしなくてはならない。

2. 研究の目的

設置されているシリコン検出器の実機の運転状況(リーク電流・全空乏化電圧・温度など)を数年にわたり連続モニターし、最適な運転条件を見出し、かつ放射線性損傷に関する系統的な知見を得る。1990年代に概要が判明したシリコンセンサーの放射線損傷のモデルは、少数サンプルを短時間に強い放射線で照射しかつ昇温してアニーリングを加速させたテーブルトップ試験の結果でしかない。それに反し、本研究の対象である数千台のシリコン検出器は、弱い放射線を長期間にわたり受け、運転温度も殆ど一定である。これらの条件の下で観測される放射線損傷と提案されているモデルとの比較を行う。

3. 研究の方法

代表者が所属するアトラス実験の数千台のストリップ型シリコン検出器は運転中の電圧・電流と温度は頻りに環境データベースに蓄積される。このデータベースを読み出して全モジュールの状態(リーク電流、温度、全空乏化電圧、ノイズと電子回路の利得など)を継続的にモニターした。それらの結果とシリコンセンサーの放射線損傷モデルの予言と比較した。さらにセンサー内で荷電粒子通過時に発生する電子や正孔が結晶内を移動してどのように電気パルスが誘起されるかシミュレートするプログラムを開発し、観測されたデータと比較する。

4. 研究成果

[1] リーク電流の研究:

シリコン検出器は放射線を浴びるとリーク電流(逆バイアル電流)が増加する。図1は最近測定されたモジュール毎のリーク電流の分布である。異なる層や場所(横軸)の違いによる差は受けた放射線量の違いに起因する。リーク電流は温度に強く依存するので、温度公式を使って基準の0°Cでのリーク電流に換算した。各検出器の温度センサーはシリコン上でなく電子回路基板上にあるため、電子回路発熱による影響を受けるので、必要な個々のシリコン結晶の温度を推定する作業が難しかった。特に端部の2000台は基板との温度差が数度もあり、さらに左右の端部での冷却設定温度が2°Cほど違ったことも手伝って、0°C換算のリーク電流が一致しなかった。共同研究者の南条氏(阪大)の発案を基に電子回路の電源をOFFにした特殊な温度スキャンを行うことにより、ようやく検出器毎の温度補正量を推定できた。

こうして得られた0°C換算の単位体積あたりのリーク電流の経年変化を、放射線損傷モデルの予言と比較した。検出器が浴びた放射線量は、陽子衝

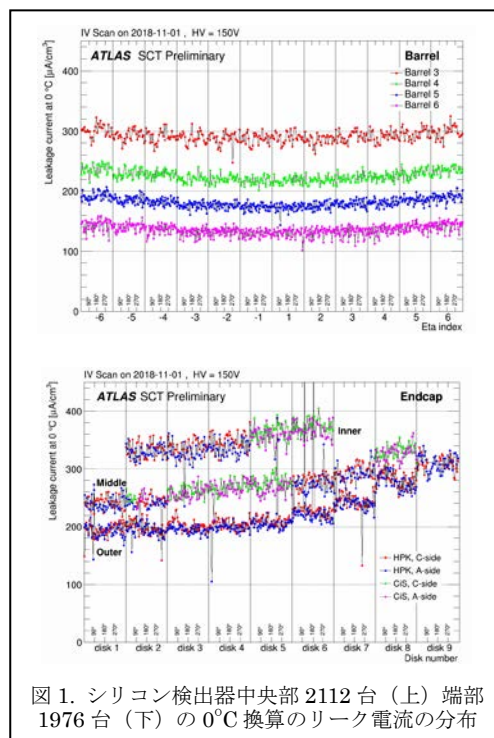


図1. シリコン検出器中央部2112台(上) 端部1976台(下)の0°C換算のリーク電流の分布

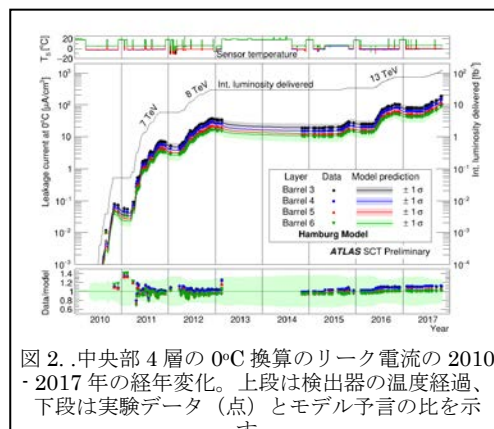


図2. 中央部4層の0°C換算のリーク電流の2010-2017年の経年変化。上段は検出器の温度経過、下段は実験データ(点)とモデル予言の比を示す

突で発生し装置内を伝播する二次粒子のシミュレーション結果に観測された輝度（ルミノシティ）の時間経過を掛けて推定した。図2に検出器中央部4層の2010年の実験開始時から2017年末までのリーク電流の観測値（点）とモデル予言（線）を示した。幅のある色はモデルの誤差を示す。最初殆どなかったリーク電流は1万倍に増加している。また下段の比が示すようにモデルとは20%以内で一致している。リーク電流のモデルには他にもあるがそれも20%以内の誤差以内でデータと一致した。ビーム運転がなかった2013-2014年の間と各冬季2,3か月の間にリーク電流はほぼモデル予言通りにアニールしていることも判明した。

リーク電流が大きくなるとシリコンセンサー内で熱が発生する。熱発生はセンサー温度を上げる。リーク電流は温度を上げると増加しさらに発熱が増える。この正帰還ループのためリーク電流が大きすぎると熱暴動が起り運転不能になる。上記のモデル（実験とよく合う）を使って実機のリーク電流の増加を予測したのが図3である。発熱による正帰還効果も計算に入れた。2023年末までに1検出器あたり3mAまでリーク電流は増加する。現状に近いセンサー熱の冷却モデルをつくり、熱暴走からの安全性を中央部の検出器について予測した（図4）。2021-2023年の運転でも熱暴走点から半分以下の状態に保てることが分かった。

[2] 全空乏化電圧の研究：

センサーの厚さ(285 μm)の全てを空乏化する最低の逆バイアス電圧を全空乏化電圧 VDF とよぶ。シリコン検出器は放射線を浴びると格子欠陥が増加し、禁止バンドの中央付近に欠陥によるエネルギー準位が出来る。その一部が電荷を持ち続けると内部電場が変化しVDFも変わる。一般に負の電荷を持ちやすいアクセプター的な欠陥レベルがより大きな影響をもつ。本研究対象のシリコンセンサーは製造した時点でN型でVDF=70Vであるが、放射線を受けると一旦V_{FD}は下がり始め、1MeV中性子換算で3x10¹³/cm²ほどの放射線を浴びるとP型に変わる。この現象を型変換(type inversion)と呼ぶ。図5にはこれまでの陽子衝突頻度(2019年以後は予想)を使って予想したシリコン検出器中央部4層の全空乏化電圧の年次変化を示した。2016-2018年の間に型変換が起っていると予想される。また2023年末にはVDFは200V近くに上昇する。2018年末時点でビームに最も近い最内層ではVDF=50Vと予想された(赤矢印)。

一方、設置された検出器4000台の全空乏化電圧の測定を試みたが様々な困難に直面した。卓上では、センサーの電極間の静電容量の電圧依存性を測ればよい。しかし実験装置に組み込まれた後は、各検出器の静電容量を測れない。間接的な手段として、(1)リーク電流、(2)通過荷電粒子の検出効率または通過時の電荷量、(3)入力換算ノイズ電荷(Equivalent Noise Charge)などの電圧依存性を測った。図6は2018年末での中央部検出器4層の検出器のリーク電流(上)と粒子検出効率(下)の電圧依存性である。最内層のデータ(赤)は赤矢印が示すように100V付近で大きく変化しており、全空乏化電圧を示しているものと思われる。図7に示したノイズ電荷量の電圧依存性も2019年末に100V付近で大きな変化を示している。ノイズはほぼセンサーの静電容量に比例していることから、全空乏化電

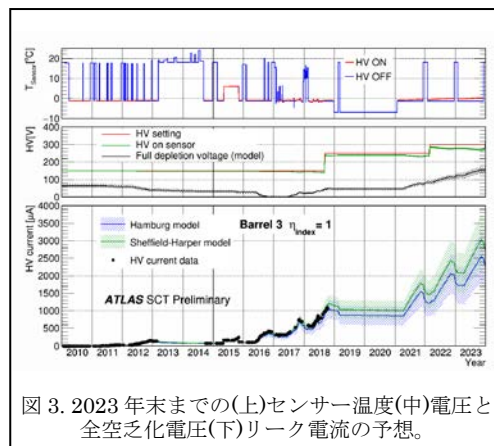


図3. 2023年末までの(上)センサー温度(中)電圧と全空乏化電圧(下)リーク電流の予想。

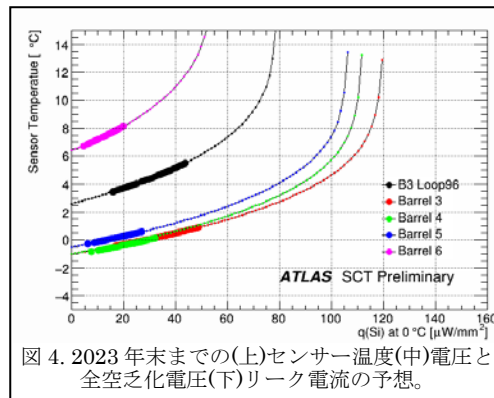


図4. 2023年末までの(上)センサー温度(中)電圧と全空乏化電圧(下)リーク電流の予想。

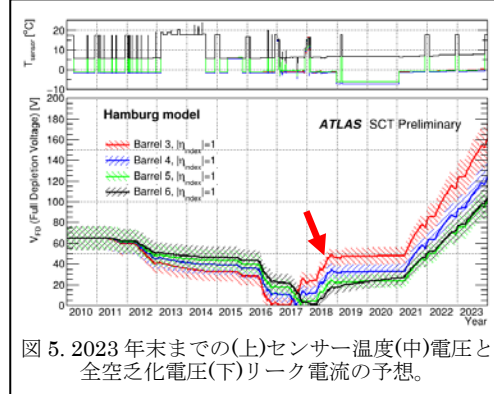


図5. 2023年末までの(上)センサー温度(中)電圧と全空乏化電圧(下)リーク電流の予想。

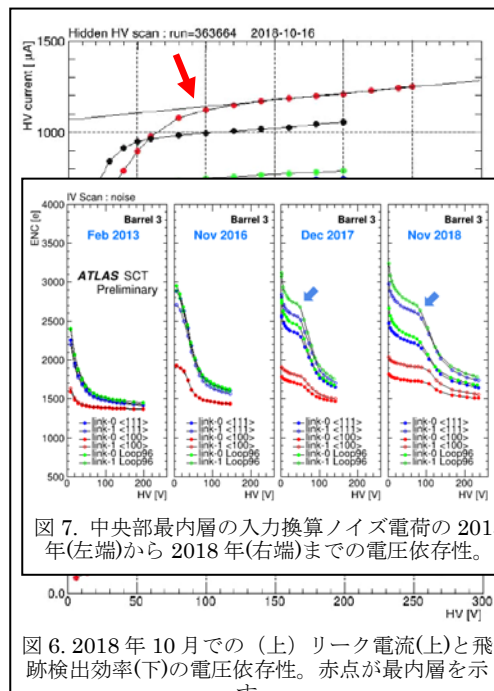


図7. 中央部最内層の入力換算ノイズ電荷の2013年(左端)から2018年(右端)までの電圧依存性。

図6. 2018年10月での(上)リーク電流(上)と飛跡検出効率(下)の電圧依存性。赤点が最内層を示す。

圧もこの付近であると推定される。

2018 年末時点での最内層の全空乏電圧が、モデル予想では 50V なのに対し、リーク電流・検出効率・ノイズの観測量すべてが間接的ながら 100V を示している。この差の原因としては、使用した放射線損傷モデル、衝突頻度からセンサー位置での放射線量を推定するシミュレーション、センサー内の電界分布、高電圧回路の電気抵抗、などの点において間違いがあると想定される。原因究明には時間がかかるが、万が一実際の全空乏化電圧が予想より 2 倍も高いと、2023 年までの運転において検出効率の低下や熱暴走などの危険があるので、引き続きこの問題の研究を続ける計画である。

[3] ノイズの研究：

信号の読出しは電荷量 1fC 以上のパルスが電極に誘起された時のみ 1 を記録するデジタル方式が採用されている。設計では入力換算ノイズ 0.25fC (電子数換算で 1500 個) と低いので 600 万チャンネルある検出器全体は非常に静かである。センサーや電子回路の放射線損傷でノイズが上昇し 1fC を越すノイズが多くなると、検出効率の下がりデータ収集に交通渋滞を起こし偽飛跡も増大する。図 8 は 2010 年と 2017 年のノイズの分布である。検出器の種類によって分けてある。ノイズは 7 年経っても殆ど変わらず運転に支障は出ていない。

しかし一部の検出器ではノイズが 20%程度増える現象が起きている (図 8 の下図)。検出器は表裏 2 枚のセンサーから構成されているが、ビーム照射を受けた直後には、表と裏のセンサーでノイズレベルが系統的に異なることが分かった。検出器の設置位置にも関係するそれらの異常ノイズはビーム運転後 1 月ほどで消失する。おそらく囲んでいる乾燥窒素ガス内で生ずるイオンがセンサーに付着して電気ノイズを高くすると推定される。

[4] 飛跡検出効率と電圧調整

22012 年春に CiS 社製センサーを使った検出器の多くが、ビーム運転中に異常なリーク電流の増加を示した。応急処置として、それらの検出器のスタンバイ電圧 (ビームのない時の電圧) を 50V から 5V に下げ、かつ大きな異常電流を示す 200 台ほどは電圧を 150V でなく 100, 80V などに下げて運転することにした。その後数年間は、ビーム強度が数十倍に増しても、ビーム運転中の異常電流は大きくならなかったため、そのような運転モードを維持してきた。理由究明はいまだなされていない。

ところが 2018 年に入ると、電圧を低くセットしておいた CiS 検出器の多くで、検出効率の低下が顕著になった。特に積算放射線量が大きい場所に位置する検出器での低下がひどかった (図 9)。異常電流が再び発生しないか注意しながら、低く抑えておいた印加電圧を 150V に戻すことにより、検出効率を 99%以上に回復することができた。

図 10 に 2018 年 7 月現在の中央部 4 層の各検出器の飛跡検出効率の分布を示した。通過粒子がセンサー一面をほぼ直角に通過するような (つまり電荷量が低い) 検出器では系統的に効率が低下していた。ビームに近いほどその傾向が強いので、放射線損傷で全空乏化電圧が上昇したためと思われる。2018 年 10 月から印加電圧を一部 250V や 200V に上げて効率を回復できた。

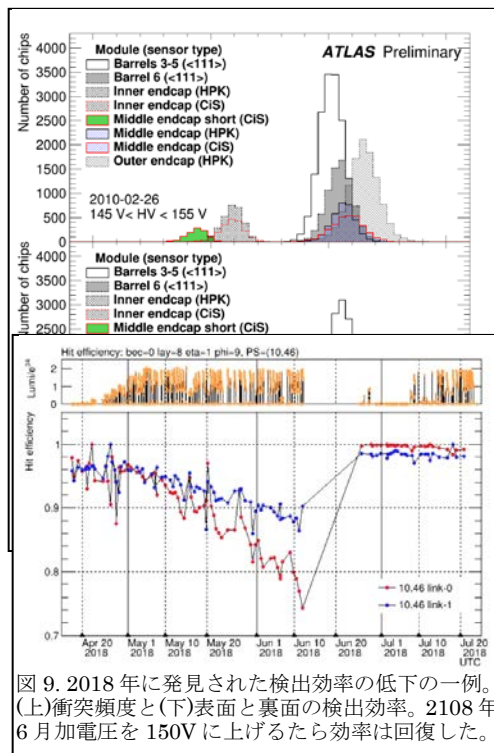


図 9. 2018 年に発見された検出効率の低下の一例。(上)衝突頻度と(下)表面と裏面の検出効率。2108 年 6 月加電圧を 150V に上げるたら効率は回復した。

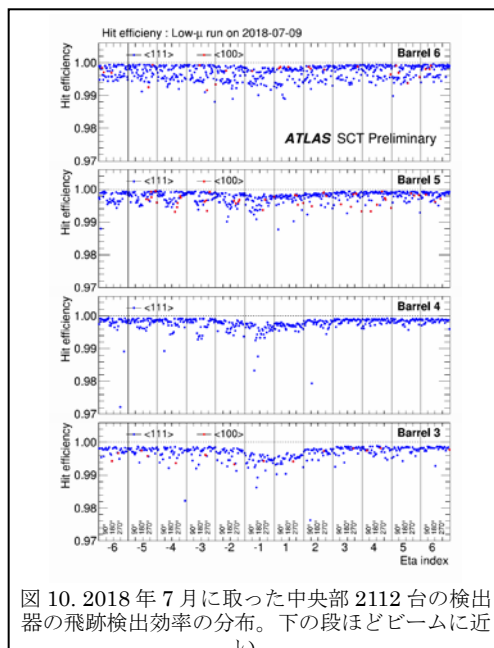


図 10. 2018 年 7 月に取った中央部 2112 台の検出器の飛跡検出効率の分布。下の段ほどビームに近い

[5] バルク内電子・正孔の移動のシミュレーションプログラムの開発：

全空乏化電圧・検出効率やノイズの変化などの放射線損傷現象は、シリコン結晶内で不純物濃度が変化することによって根本原因がある。センサー内の電場の分布は不純物濃度に大きく依存する。図 11 は全空乏化電圧 70V の N 型センサーに 150V の電圧をかけた時の厚さ方向の電場分布である。有限要素法を使うとストリップ電極付近で電場が大きく歪んでいることがわかる。この電場を使ってセンサー内で誘起された正孔や電子のドリフトをシミュレートできた(図 12)。ラモの定理を使って電極に誘起される電荷を 0.5ns 毎に計算し、差分を電流としてアンプに入力し波形整形する(図 13)。

プログラムの基本は出来たので、今後はアトラス実験チームのシミュレーションソフトに組み込む。放射線損傷の効果を見るために、いろいろな値の不純物濃度と印加電圧に対するデータベースを用意する必要がある。そのためには TCAD と総称される有限要素ソフトを使う必要がある。

最終的には、実験データである検出効率やローレンツ角などとの比較を行い、放射線損傷のモデルの検証や改善に寄与したい。

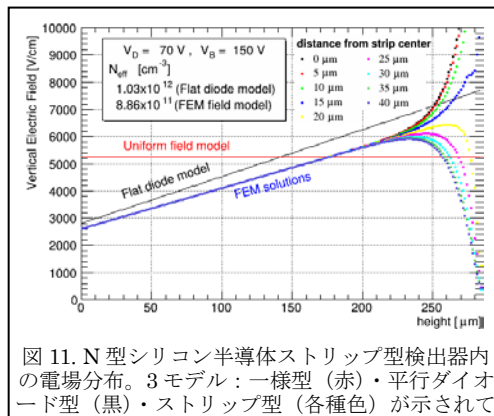


図 11. N 型シリコン半導体ストリップ型検出器内の電場分布。3 モデル：一様型 (赤)・平行ダイオード型 (黒)・ストリップ型 (各種色) が示されて

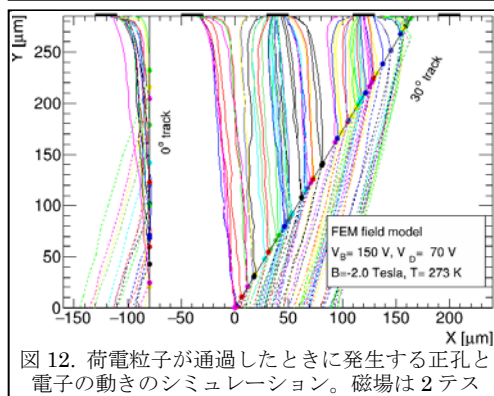


図 12. 荷電粒子が通過したときに発生する正孔と電子の動きのシミュレーション。磁場は 2 テス

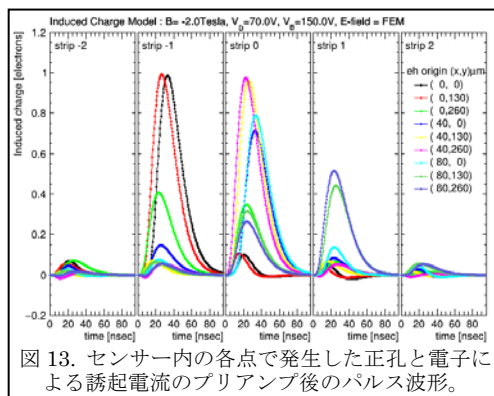


図 13. センサー内の各点で発生した正孔と電子による誘起電流のプリアンプ後のパルス波形。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 近藤 敬比古 他 Measurements with the ATLAS strip detector, Radiation effects at the LHC experiments and impact on operation and performance, 2018 年 4 月
- ② 近藤 敬比古, 音野 瑛俊, 織田 勸 他、LHC-ATLAS 実験シリコンストリップ検出器の放射線損傷の現状、日本物理学会 2018 年次大会, 東京理科大学 2018 年 3 月
- ③ (ポスター発表) 近藤 敬比古 他 Radiation damage status of the ATLAS silicon strip detectors, 11th Int. Symposium on Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11), 沖縄、2017 年 12 月

6. 研究組織

- (1) 研究分担者：なし
- (2) 研究協力者

研究協力者氏名：音野 瑛俊 九州大学先端素粒子物理研究センター
ローマ字氏名：(OTONO, Hidetoshi)