

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13492

研究課題名(和文)多結晶人工ダイヤモンドとダイヤモンドFETを組合わせた究極放射線耐性検出器の開発

研究課題名(英文)High radiation tolerant detector development enabled by the combination of polycrystalline diamond and diamond FET

研究代表者

西口 創(Nishiguchi, Hajime)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：10534810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：加速器を用いた素粒子・原子核実験では、近年のメガワット級加速器のような大強度化ビームの恩恵により様々な学術的成果が見込まれる半面、その大強度ビームに起因する検出器の放射線損傷への対応が喫緊の課題となっている。近年、合成ダイヤモンド結晶を半導体検出器として利用するダイヤモンド検出器が優れた放射線耐性を持つ事が示され、実用化の研究が進められている。

本研究では、製造が難しく非常に高額な単結晶ダイヤモンドではなく、安価な多結晶ダイヤを用いる事で、エネルギー計測の精度は犠牲にしつつも、放射線計数に特化した検出器としての運用を目指し、大強度陽子加速器における新しいビームモニタを開発する事に成功した。

研究成果の概要(英文)：Thanks to the very high power accelerator such as the MEGA-WATT-class proton machine, prismatic results are expected for the recent high-energy/nuclear experiments. On the other hand, the radiation hardness of particle/radiation detectors is becoming a very important and urgent issue. The diamond-base semiconductor detector has gotten many attentions due to its strong radiation tolerance.

In this research, we aim to operate a diamond detector specialized in only radiation counting, while sacrificing the accuracy of energy measurement, by using an inexpensive polycrystalline diamond instead of mono-crystal diamond which is difficult to manufacture and very expensive. By this idea, we succeeded in developing a new type of beam monitor in a high intensity proton accelerator.

研究分野：素粒子実験

キーワード：放射線検出器 ダイヤモンド検出器 半導体検出器 ビームモニタ 大強度加速器 ミューオン

## 1. 研究開始当初の背景

大強度陽子加速器施設(J-PARC)や大型ハドロンコライダー(LHC)等に代表される近年の大強度加速器では、その特徴たる強大なビーム強度の恩恵により様々な学術的成果が見込まれているが、その一方で強大なビーム強度が故にそれを受け止める素粒子・放射線検出器の側で放射線損傷に起因する機器動作異常への対策が喫緊の課題となっている。そこで、優れた放射線耐性で知られるダイヤモンド結晶を半導体検出器として動作させる「ダイヤモンド検出器」に、大強度加速器実験における次世代ビームモニタとして期待が高まってきている。しかしながら、人工ダイヤモンドはその特異な合成技術のために、(1)センチメートルクラスの大きな結晶合成が困難、(2)非常に高額、という難点があり、放射線検出器としての動作原理実証研究までは多くの開発現場で成功裡に進んだものの、検出器の大型化や高エネルギー実験における広範な実用化の研究はあまり進んでいない。現在計画されている新しいミュー粒子稀崩壊探索やニュートリノ振動精密測定、K中間子稀崩壊分岐比測定等、大強度加速器無くして推進困難なこれらの高エネルギー実験では、大強度ビームモニタの耐放射線化は待った無しの重要課題の一つと言える。

## 2. 研究の目的

ミュー粒子=電子転換過程は、レプトンフレーバーの保存を破る稀過程であり、素粒子標準理論では起こりえない現象である。然しながら、標準理論を超える新しい物理の枠組みにおいてはおよそ1,000兆分の1の確率で発現することが予言され、新物理の兆候を探る有力なプローブとして期待されている。我が国ではミュー粒子=電子転換過程の発見を目指した国際共同実験「COMET」の準備が急ピッチで進められているが、その極めて小さな崩壊率のため、膨大な数のミュー粒子崩壊過程を高精度で検知する必要があり、COMET実験では大量のミュー粒子を生成可能なJ-PARCに専用のビームラインを建設し、そこに高感度検出器群を設置することでこの極めて小さな崩壊確率に迫る探索実験を実現する。

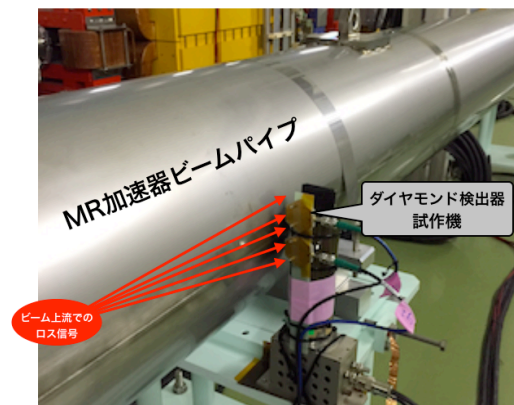
この実験を実現するために必要な幾つかの開発項目のうち、もっとも重要であり且つ実現に困難を伴うものに、J-PARCにて供給される大強度陽子ビームを安定に且つ高精度で検知するビームモニタの開発が挙げられる。そこで本研究では、優れた放射線耐性を持つことで近年注目を集めているダイヤモンド検出器に着目、特に従来用いられてこなかった多結晶ダイヤモンドを採用することで、検出器の大型化や高コスト問題を解決し、高エネルギー実験における次世代ビームモニタとしての新しい可能性を探る事を目的

とする。

## 3. 研究の方法

従来のダイヤモンド検出器では、結晶界面での電荷輸送効率低下を防ぐために単結晶が用いられて来たが、単結晶合成の難しさから大型化が出来ない・非常に高額である、という問題があった。そこで本研究では、電荷輸送効率に依存しないような測定に特化し、多結晶ダイヤモンドを用いた大強度ビームモニタ開発を目指した。本研究では4種類のダイヤモンド検出器試作機を製作した。

試作機1号機は、3.5mm角の多結晶を用いて実装、主にJ-PARC・30GeVメインリング(MR)加速器のビームパイプ脇に設置して大強度ビームがビームパイプ内部の残留ガスと衝突することで生じる放射線信号(ビームロス信号)を検知することに挑戦した。この1号機は主に、220m離れたMRトンネルと地上制御室の間における高電圧伝達、およびアナログ信号の伝達の最適化を図ることが目的である。図1にMRビームパイプ脇に設置したダイヤモンド試作機1号機とその試験の様子を示す。図1に示されている通り、検出器



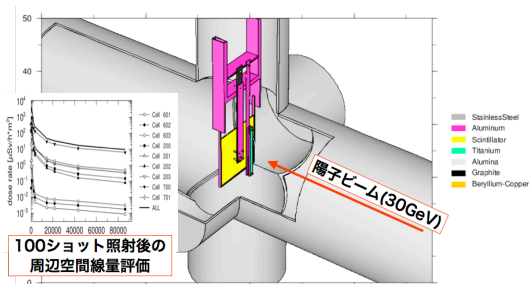
【図1・ダイヤモンド検出器試作機1】

試作機1号機はビームパイプの直脇に設置し、上流のビームがビームパイプ内の残留ガスとの衝突で生成する放射線(ビームロス)の信号を検知することで、検出器の動作を試験した。特に、加速器環境ではシンクロトロンにおける高周波加速のためのRF機器があり、これに起因するノイズの抑制が肝要であり、試作機1号機におけるシールドの実装方法を中心に最適化した。

次いで、同等の試作機2および3号機を製作、これらを前段加速器からMRへ入射する「コリメータ部」及びMRから素粒子原子核実験施設へ出射する「静電セプタム部」へ設置した。これら2か所は、非常に高い放射線環境で知られるが、前述のビームロス信号を高感度で検知することに挑戦し、極めて強い残留放射線に曝される環境下での動作試験を目的とした。

最後に、上記の試作機を高真空中に設置出来るよう改造、さらに大強度陽子ビームを直接照射出来るよう、放射化および放熱の最小

化を図った試作機4号機を製作した。J-PARC・30GeVシンクロトロンは現在、ニュートリノビーム供給を主目的とした運転時には、470kWという大強度で運転しており、この強度のビームを直接照射すると、検出器試作機の相当な放射化が予想され、研究の遂行そのものの可否が左右される。そのため、放射化を最低限に抑制するための検出器構成素材の選定、並びにどの程度の照射量ならば許容される放射化となるのかを、事前に詳細にシミュレーションで見積もる事が必要となる。そこで、図2のように汎用放射線輸送計算コード・PHITSを用いたシミュレーション研究を進めた。PHITSシミュレーション

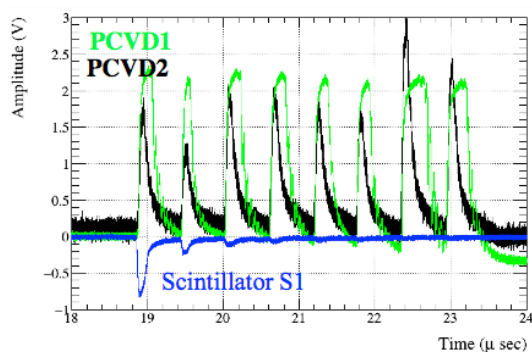


【図2・ビーム照射後の線量評価】

の結果に基づき、検出器構成素材を選定、大強度陽子ビーム照射の手順をJ-PARC加速器担当者と調整の上で最適化し、検出器のインストールに臨んだ。検出器のシールドやアナログ信号増幅回路の最適化等は検出器試作機1号機の開発経験を活かした。尚、通常加速器にて生成した荷電粒子ビームを用いた放射線検出器の試験は、照射のための施設へとビームを加速器から取出して実施されるが、本研究では「大強度陽子ビームを直接照射する」事が肝要であるため、検出器試作機を30GeVシンクロトロンビームパイプ内部へ直接挿入する必要がある、加速器の運転に支障を生じさせないように、真空度の悪化等を引き起こさないよう、超高真空維持の側面からも検出器構成素材選定を行った。

#### 4. 研究成果

製作したダイヤモンド検出器試作機1号機をMRビームトンネル内に設置、これに信号増幅器を直接接続した上で、220m離れた地上制御室よりダイヤモンドへ500Vのバイアス電圧及び信号増幅回路への駆動電圧を印加、更に増幅回路の出力信号を地上制御室へ戻しこれを測定した。この試験は、30GeVシンクロトロンでニュートリノビーム供給直前に加速器を調整運転する際、ビーム供給されない加速された陽子ビームを捨てるためのアポトラインで実施した。ビーム起因の信号を検知するため、ダイヤモンド検出器の他に従来のプラスチックシンチレータと光電子増倍管(PMT)を組合わせた粒子カウンターも設置し、双方の信号を同時に検知して比



【結果1・検知したビームロス信号】

較した。結果1に示す通り、この試験によりダイヤモンド検出器試作機1号機は30GeV陽子ビームのビームロス信号を極めて高感度で検知することに成功した。結果1下部に示される「Scintillator S1」が従来の粒子カウンターからの出力信号で、結果1上部に示されるPCVD1及びPCVD2がダイヤモンド検出器試作機1号機からの出力信号である。信号が8つの塊に分かれているのはJ-PARC・30GeVシンクロトロンが陽子を8つの塊(バンチ)毎に加速しているからで、8つのバンチそれぞれに対応した信号がはっきりと検知された。それぞれのバンチ毎に $10^{12}$ 個程度の陽子が充填されており、従来の粒子カウンターでは最初のバンチの信号を処理した際に既に出力が飽和し、2バンチ目以降の信号が正常に出力されていないことが見て取れる。試作機2及び3号機も成功裏に試験され、過酷な放射線環境下でも優れた放射線耐性を発揮した。

以上の結果を踏まえ、更に既述のPHITSシミュレーションの結果により構成素材及び設計を最適化したダイヤモンド検出器試作機4号機を製作、これをMRビームパイプ内部へインストールした。残念ながら、本研究期間内では、この試作機4のMR加速器ビームパイプ内部へのインストール及びその後の真空度のモニタの結果、陽子ビーム照射の許可を得るところまでは完了したが、2年という事業年限内に大強度陽子ビームの直接照射まで実現することは叶わなかった。

本研究の結果、多結晶ダイヤモンドを用いても、大強度ビームモニタのようにエネルギー計測や少統計事象等を必要としないケースに特化すれば、十分に高感度なビームモニタを実現可能であることが示された。更に、ダイヤモンドの優れた特性の一つである高い放射線耐性により、大強度加速器のような過酷な放射線環境においても安定動作可能であることが示された。ダイヤモンド結晶の加速器環境下での放射線耐性は示されたが、残念ながら信号読出回路の素子が放射線損傷によって動作不良を起こしてしまったため、どこまで高い線量に耐え得るかという耐久試験は実施出来ずに終わったが、検出器は読出回路を含めて検出器なので、検出器の耐放射線性能という観点からは、回路も含めた

耐放射線化は今後の重大な課題と言える。

尚、本研究の成果を一部引き継いだ新しい科研費事業（新学術領域研究・ニュートリノフロンティアの融合と進化/公募研究「ダイヤモンド結晶を用いて実現する大強度加速器時代の新しいビーム性能向上の研究」H28-29/代表・西口創）を本研究 2 年目から並行して実施している。これは本研究で実現した、「ダイヤモンド検出器の大強度ビームモニタへの応用」を、ビーム性能向上に役立てるための更なる応用研究である。本研究で開発したが、大強度陽子ビームの直接照射に至らなかった試作機 4 号機は、この新しい事業に引き継がれ、いよいよ大強度陽子ビームの直接照射に挑む事になった。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 藤井祐樹・西口創・橋本義徳・他、  
「COMET 実験のためのダイヤモンド半導体を用いた大強度陽子ビームモニタ検出器開発の現状」、日本物理学会第 7 2 回年次大会、2017 年 3 月 17-20 日、大阪大学（大阪府・豊中市）
- ② Y.Fujii、「Status and prospect of extinction for muon experiments」、国際会議 HINT2016、2016 年 12 月 5-8 日、J-PARC(茨城県・東海村)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西口 創 (NISHIGUCHI HAJIME)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：10534810

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

橋本 義徳 (HASHIMOTO YOSHINORI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・前任技師

研究者番号：10391749

藤井 祐樹 (FUJII YUKI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・博士研究員

研究者番号：50775004