

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20926

研究課題名（和文）非線形電気光学効果を応用した全く新しい大強度ビーム検出器の可能性

研究課題名（英文）Development of a brand-new radiation-detection technique by non-linear electrooptics to monitor high-power beam

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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大強度加速器におけるビーム検出器の放射線損傷の問題を、従来とは全く異なる動作原理に基づく検出器の開発で克服することを目指す。そこで、大強度ビームによる空間電荷効果が引き起こす微小な電場擾乱を、誘電体の持つ非線形電気光学効果を応用する事でこれを検出し、放射線耐性に優れたビームモニタの実現を目指す。

そこで、非線形電気光学効果を示す誘電体とレーザーを組み合わせた屈折率センサーを製作し、ビーム照射の前に実験室で試験した。その結果、電場変化に伴う屈折率の変化は検知出来たが、ビームモニタとして運用する場合の時間特性を満たさないことが判明した。今後はこの課題の解決が望まれる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、非線形電気光学効果（カー効果）を発現する誘電体による微小な屈折率変化を、レーザーにより光強度を上げることで検知することが出来る可能性を示すことが出来た。残念ながら、大強度ビームモニタとして活用するという本研究の最終目的を達成するには至らなかったが、光産業分野で盛んに利活用されている電気光学効果を、全くの異分野で応用する可能性が見出されたことは大きな意義がある。また、大強度ビームモニタは、高線量被曝量の推定に欠かせない技術であり、今後社会的に課題になることが明らかである、原子炉の廃炉技術開発にも繋がる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to overcome the problem of radiation damage to beam detectors in high-intensity beams by developing a detector based on a completely different operating principle from conventional detectors. Therefore, we aim to detect electric field disturbances caused by the space charge effect of high-intensity beams by applying the nonlinear electro-optic effect of dielectrics, and to realize a beam monitor with excellent radiation resistance. We therefore made a refractive index sensor that combines a dielectric that shows a nonlinear electro-optic effect with a laser, and tested it in the laboratory before beam-irradiation test. As a result, we were able to detect changes in the refractive index due to changes in the electric field, but it was found that the time characteristics did not meet the requirements for operation as a beam monitor. It is hoped that this issue will be resolved in the future.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：放射線検出器 大強度加速器 大強度ビーム ビームモニタ 電気光学効果 非線形電気光学効果

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学における加速器を用いた実験研究では、より高いエネルギーに到達可能な加速器を開発し、より高いエネルギーにおける素粒子現象を調べるといったアプローチ(エネルギーフロンティア)が従来踏襲されてきたが、現代の加速器開発では、相当なリソース(経済的、人的共)が必要である。そこで近年注目されているのが、従来到達可能なエネルギーの加速器を大電流化し、より多くの素粒子反応を精査することで、より高いエネルギーでの素粒子相互作用に起因する新現象に迫るといったアプローチがある。例えば、SuperKEKB 加速器を用いた Belle2 実験、大強度陽子加速器施設(J-PARC)におけるニュートリノ実験(T2K)やミュオン実験(COMET)などが挙げられる。それらの実験における大強度ビームを調べる検出器では、ビームの強度増強に伴い、検出器の放射線損傷の問題が喫緊の課題となっている。最も放射線耐性が強いと考えられているダイヤモンド(合成ダイヤモンド)を用いた半導体検出器でさえ、 $10^{17}/\text{cm}^2$  程度の照射(1MeV 中性子換算)で検出器動作に劣化が見られることが知られている。これ以上の強度のビーム照射に耐える検出器の開発は可能か?、研究開始当初は検出器素子をより細分化する程度しか、対処方法が見出されていない状況であった。

## 2. 研究の目的

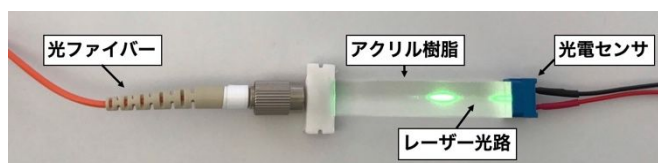
本研究では、大強度加速器におけるビーム検出器の放射線損傷の問題を、従来とは全く異なる動作原理に基づく検出器の開発で克服することを目指す。そこで、大強度ビームによる空間電荷効果が引き起こす電場擾乱を検出可能であることを示し、微小な電場擾乱の検出は誘電体の持つ非線形電気光学効果を応用する事で実現する。誘電体に電場を印加すると屈折率が変化する事が知られており、光学産業では屈折率や光透過を制御する技術として広く応用されている。これを逆転の発想で応用し、ビーム起因の電場擾乱により引き起こされる屈折率変化を検知、これによりビーム検出を実現する。この方式なら、検出器の媒体に放射線損傷が起きても、ビームにより引き起こされる電場擾乱の大きさに影響はないため、検出器としての動作そのものに大きな影響はない。本研究により、J-PARC で計画中のミュオン電子転換過程探索実験や、将来の大強度ニュートリノ実験でも安定に精度良く動作可能な大強度ビーム検出器が実現可能になる。本研究で全く新しい検出原理を実証することで放射線損傷問題を克服、より大強度なビームを用いた実験を可能にし、より高いエネルギー領域に迫る新しいアプローチを切り拓く。

## 3. 研究の方法

まず、電場の変化を屈折率の変化として捉える電気光学効果を応用したセンサーを開発し、これに実際に電場を印加して、屈折率の変化として測定する。センサーの基礎特性(屈折率と電場変化量との関係の較正データ、および電場変化量の測定精度)測定が済み次第、このセンサーに大強度陽子ビームを照射し、センサーがある場所における空間電場の擾乱をセンサーで測定し、ビームモニタとしての性能を評価する。ただし、このセンサーは「大強度ビームに耐える」ことが基本目的であるため、どのような素材でも良い訳ではない。従来、電気光学効果を示すことがよく知られた素材は、大強度ビームを測るモニタとしては相応しくない。そこで本研究では、一次の線形電気光学効果(ポッケルス効果)と違って様々な素材で効果を示す二次の非線形電気光学効果(カー効果)に着目してビームモニタとしての応用を企図した。ただし、カー効果は効果の発現量が非常に小さいため、光強度を上げることでこれを補償することを目指す。

## 4. 研究成果

放射線耐性に優れ、尚且つ電気光学効果を示すため結晶性を持つ、という二つの性質を持つ材料として、結晶性 PET 樹脂に着目した。一般に市場に提供されている PET 樹脂は、その成形過程で結晶性を失うため、「結晶化」と呼ばれる加熱処理を施した PET である。この他、参考材料として結晶性ポリカーボネートとアクリルを用いたセンサーも製作した。図1に試作した屈折率センサーを示す(アクリルの例)。写真では、視認性のため、レーザーポインターからの光を導入して遮光を外してあるが、実際には微小な電場擾乱を検出するために強力な



【図 1】

Nd:YAG レーザーの 4 倍波で動作させる。なお、実験室での動作試験時にはこれに遮光を施すが、最終的なビームモニタとして動作させる際には、真空ビームダクト内に設置されるため、遮光は外して運用する。

ビーム照射の前に実験室で、まず電場擾乱を屈折率変化として捉えられるかどうか試験した。ここでは、大強度ビームにおける空間電荷効果により惹起される相当量の電場変化を、センサー誘電体部分に印加する定電圧電源（直流電源）の出力をコントロールすることで再現した。結果は、極めて微小な屈折率変化として有意に検知されたが、これが実際に電場擾乱を検知出来たのかどうか、直流電源が電圧を変化させた結果生じるノイズを検知しただけなのか、対象とする電場変化とそれに相当する小さな屈折率変化からは判断出来なかった。これを解決すべく電源への AVR 接続等試したが、判然としなかった。ただし、実際の大強度ビームによる電場擾乱の場合は、測定系への入力電源に揺らぎは生じないため検出出来る可能性があると考え、大強度加速器施設（J-PARC）のメインリングシンクロトロン（MR）の終端部（アポートライン）での照射試験を企図した。残念ながら、MR では大規模な電源更新がなされ、かつその期間が延長されたため、本研究期間中に照射試験を実施することは叶わなかった（研究期間中に MR のビーム運転は再開されたが、休止中に予定されていたビーム供給運転を優先したため、アポートでの試験時間等を要求する余裕はなかった）。

一方で、ビームがモニタを通過する際の電場擾乱は極めて短時間に起きることが考えられる。このことは、研究開始時には想定していなかったことであり、実験室でパルス電源を用いることで再現試験が出来ることに着目し、MR でのビーム照射機会を待つ間、実験室で簡易試験を実施した。その結果、ビームで電場擾乱が惹起される程度の時間（ナノ秒）では、そのような屈折率変化は有意に検知出来なかった。このような課題が残ったが、センサーの試作および実験室での性能評価までは実現したので、今後は屈折率測定系の改良を経て、パルス電場擾乱を検知出来た暁には実際のビーム照射試験を実現したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------