

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01238

研究課題名(和文) 極限放射線環境下における高感度非破壊プロファイルモニタの研究開発

研究課題名(英文) Development of high-sensitivity non-destructive profile monitor under extreme radiation environment

研究代表者

豊田 晃久 (Toyoda, Akihisa)

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：20373186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：本プロファイルモニタを実現するために必要なことは、機器の耐放射線性能が十分であること、必要測定分解能を満たすこと、信号量とS/Nが十分であることの3つである。耐放射線性能についてはシミュレーションで放射線場を計算してそれに耐える機器を設計した。測定分解能については電場と磁場の一様性と光学分解能をシミュレーションで最適化した。信号量とS/Nについては発光効率を実測し、バックグラウンドを計算で評価した。以上の設計に基づき機器を製作し、ビームタイムにて収量、S/Nおよび分解能について定量的な評価を行うことで、極限放射線環境下での高感度非破壊プロファイルモニタを実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回100 Gy/hを超える極限放射線場においても動作する非破壊、高感度ビーム診断システムの構築を現実のものにすることができた。これにより大強度による極限放射線場においてごく微量の信号をどうやって取り出して精度よく測定するのか？モニタ本体の耐放射線性能をどうやって確保するのか？ビームをいかに擾乱させずに(ロスを生じずに)連続的に測定するのか？という問題を解決に導くことができ、大強度ビームを安定かつ連続的に監視診断するビームプロファイルモニタが実現できたため、大強度ビームによる高統計を生かした精密測定実験を推進することにつながり学術的、社会的に極めて意義が高い。

研究成果の概要(英文)：There are three points to realize this profile monitor. The first one is that the radiation resistance of the equipment is sufficient. We calculated the radiation field by simulation and designed the equipment to withstand it. The second one is that the required measurement resolution is satisfied. We optimized the uniformity of the electric and magnetic fields and the optical resolution by simulation. The last one is that the signal amount and the S/N are sufficient. The luminous efficiency was measured for the signal amount. The background was evaluated by calculation for the S/N evaluation. By manufacturing the equipment based on the above design, and quantitatively evaluating the yield, the S/N, and the position resolution at the beam time, we realized the highly sensitive non-destructive profile monitor under the extreme radiation environment.

研究分野：素粒子原子核実験

キーワード：大強度ビームモニタ 耐放射線 ビームプロファイル

1. 研究開始当初の背景

近年、物理学分野のみならず、産業、医療分野においても大強度の電子、陽子などの量子ビームラインに対する熱望が日に日に高まっている。例えば基礎物理学分野においては、史上最高のエネルギーを生み出す装置 LHC(ラージハドロンコライダー)が本格的に稼働し、それに伴い標準理論を超える理論の議論も活発化している。素粒子物理学は今まさに大きく進展する転換期にあると言える。その状況下において LHC の「高エネルギービームによる未知粒子の直接生成法」とは異なる別のアプローチとして、大強度陽子加速器 J-PARC による「大強度ビームによる高統計を生かした精密測定法」の重要度が増しつつある。

この状況下で J-PARC ハドロン実験施設では、新規分岐ビームラインの B ライン(high-p ビームライン)が建設中であった。このビームラインでは、Higgs と並ぶ質量獲得機構である「カイラル対称性の破れ」について探索する実験や、素粒子クォークの物質中での分布の偏りを調べる実験などが計画されている。これにより世界初の新しいエネルギーおよび密度領域にアクセスすることが可能になり、物質の構成要素であるハドロンを記述する QCD(量子色力学)理論の理解をさらに進めることができる。このような大強度ビームラインを安全、安定的に運転し、かつ精度の良い実験を行うために、ビームの状態を安定かつ連続的に監視診断するビームプロファイルモニタの開発がますます重要な意義を持つようになっていた。

2. 研究の目的

大強度化で一番問題になるのはビームロスによる高放射線場である。特にビーム分岐部や標的などどうしてもビームロスが避けられない場所があり、その近辺の放射線場は非常に高くなる。本研究はこういった極限高放射線場においても分岐ビームラインのような少量のビームを高感度で診断できるシステムを構築する。また高精度の実験を行うためにはバックグラウンドを低減する必要があるため、モニタ自身で生じるビームロスも極限まで低減する。つまり従来の蛍光板はもちろん、フォイルからの二次電子モニタなど微量でもビームロスを生じるモニタは連続ビーム診断用として不適当であり、ビームロスを生じない非破壊型のモニタを開発する。以上により、100 Gy/h を超える極限放射線場においても動作する非破壊、高感度ビーム診断システムの構築を現実のものにするのが目的である

3. 研究の方法

従来のプロファイルモニタとしては、例えばビームが当たると発光する薄膜蛍光板を設置し、生じた光をレンズで集光しカメラで計測していた。このようなモニタを大強度ビームラインに設置することには、大きく分けて3つの問題点がある。第1の問題はビームロス増大である。つまり破壊型であるため発光体自身がビームロスを増やしてしまうことである。第2の問題はバックグラウンドの多さである。極大ビームロス点では散乱荷電粒子が多数あり、レンズ等を直接叩くことで低バックグラウンドが特長の光検出モニタにチェレンコフバックグラウンド等を生じてしまう。第3の問題はメンテナンス性の低さである。ビームライン近傍にレンズやカメラなど放射線に弱く交換頻度の高いものを使っているためである。

上記第1の問題であるビームロス増大を解決するには、信号発生メカニズムを変える必要がある。その目的で、残留ガスを利用した信号を利用する。ビームラインに残留しているガスをビームがイオン化し、ビーム形状を反映した電離電子を電場と磁場で分割電極に収集するのがこのモニタの仕組みである。これにより問題1は解決するが、分岐ビームラインである high-p ビームラインではビーム量が少なく信号が小さすぎる問題が生じる。これは第2の問題と合わせて更に S/N の低下を招く。信号を増幅する方法として電離電子からの電気信号を光に変えて伝送し、放射線場の低い領域、つまりビームラインから離れた位置で電気信号に戻して増幅することを考えた。光であればバックグラウンドを極限まで減らすことが容易に可能で問題2が解決できる。ただし蛍光体で光に変える際、光が等方的に広がるため集光システムが必要になりかつ耐放射線性が要請される。その集光システムとして望遠鏡光学による大立体角で微弱光を捕捉する。またチェレンコフバックグラウンドを低減するために、ビームライン近傍にレンズを置かない反射望遠鏡光学を採用する。伝送されたプロファイル光はビームロスが少ない最終段の IIT(イメージ増幅器)によって増幅され、光学カメラで検出される。メンテナンスの必要な部分はビームロスが少ない場所にあるため問題3も解決される。

以上のシステムにより、100 kW を超えるような大強度ビームライン近傍においても動作し、かつ数 W の微弱ビームを常時診断できるような耐放射線超高感度プロファイルモニタが実現する。

4. 研究成果

上記研究目的を達成するために、まず測定領域の大きさを、計算上のビームプロファイルの大きさから決定した。この領域に応じて必要な電場や磁場の一様度を有限要素法計算ソフトによって評価した。導出された電場磁場の一様度から測定分解能である 1 mm 前後が達成できること評価できた。得られた結果に基づいて磁場の強さ、電極板の大きさを決定した。

測定分解能については光学の分解能も重要である。レンズ光学にすると分解能は出しやすいが、メンテナンスの頻度が上がる問題があるので、メンテナンスがほぼ不要な表面鏡を利用した反射鏡光学を採用した。光学計算ソフトを利用し、収差を打ち消しあう2枚の反射鏡を利用した光学を候補として光学パラメータを調整し決定した。またシミュレーションによってビームラインのビームロスや放射線レベルを評価した。これにより放射線に比較的弱い撮像系のビームラインからの距離を決定した。

次に信号量を評価した。電離電子の数は実際にハドロンビームラインで使用中の残留ガスモニタの出力値から導出した。イメージ増幅器の増倍率、光学の立体角、カメラの感度を考慮し、蛍光面の効率などの程度必要かを評価した。蛍光面の発光効率を測定するためのセットアップを設計製作した。

続いて計算機シミュレーションを用いてビームライン各所におけるバックグラウンドの評価を行い、バックグラウンド粒子が発光体やイメージ増幅装置、カメラやリレーレンズなどに当たることによって生じるバックグラウンド発光量と、ビームによる残留ガスの電離電子が発光体に当たって生じる信号発光量の詳細な比較を行った。その結果申請時の想定以上に発光体の厚さをコントロールする必要があることが分かり、具体的には発光体の厚さを60 μm以下まで薄くしないと十分なS/Nが得られないことが分かった。これを受けて収量を増大させる目的で申請時の研究計画にはなかった、残留ガスで生じた電子を、高電圧をかけることによって加速して蛍光体に入射することで発光効率を上げることを検討した。ところがその加速電子のエネルギーレンジと発光体の厚みに対する発光効率のデータが現時点で存在しないことが判明したため、実際に電子発生装置で生じた電子を蛍光体に入射してカメラで測定し、発光効率の加速電子エネルギーおよび発光体の厚みへの依存性を評価する必要性が生じた。この発光効率測定実験のためのセットアップの設計・製作を追加で実施した。この発光体の発光効率測定実験セットアップを使用して、発光効率を測定した。具体的には各電極の電圧の値および、電子発生装置であるEGAの出力電圧の値を変えながら電子を出射し電極で加速して蛍光体に入射させた。生じた発光をカメラで測定し、その画像データを、画像取り込みモジュールを利用してPCに取り込んだ。取り込んだデータを各種の画像解析ソフトウェアを利用して解析することで発光分布や発光強度のデータを取得した。EGAの出力エネルギーおよび出力量で規格化された発光量を求めることで発光効率を評価した。その上で入射電子を遮断板で一部遮ることによって位置分解能を評価した。また中間加速電極がなくても十分な性能が出ることが確認できたので、メッシュによる電子線の損失を減らすために当該電極を取り除くことができた。これらのデータに基づいて発光効率および位置分解能に最も優れた最適な発光体、電極のセットアップおよび設定値、およびカメラ観測方法が決定できた。続けてこのセットアップ構成を実現できるような内部電極および真空チェンバーを設計製作した。また上記光学計算を実現できる大立体角光学系暗箱および架台を製作した。光学要素のあおり角度や位置を調整できる機構を備えた光学セルを内蔵した光学暗箱を設計製作した。完成後は、レーザーコリメーターなどを利用して光学要素のアライメントを実施し、ハドロン実験施設所有の暗室内において倍率、集光効率などの光学性能を確認した。並行して内部電極および真空チェンバー、ヘルムホルツコイルを設計製作し、電源に接続して試運転を実施し、コイルの温度上昇の確認およびホールプローブを利用した磁場の一様性の確認を行った。

その後ハドロン実験施設のBラインコリメータ下流に機器を設置した。ビームタイムにて実際のビームのプロファイルを測定し、収量、S/Nおよび分解能について定量的な評価を行い、極限放射線場においてもビームを乱すことなく高感度で正確かつ連続的に、広いダイナミックレンジでビームプロファイルを診断できる検出器を実現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 A. Toyoda他16名 | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 DEVELOPMENT OF HIGH SENSITIVITY RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITOR FOR J-PARC HADRON HIGH-P BEAMLIN | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 498, 500 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 里 嘉典 (Sato Yoshinori) (30342603) | 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 (82118) | |
| 研究分担者 | 上利 恵三 (Agari Keizo) (30391741) | 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・技師 (82118) | |
| 研究分担者 | 森野 雄平 (Morino Yuhei) (50715240) | 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・助教 (82118) | |

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 |
|---------|---------|