

平成22年4月1日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20740155
 研究課題名（和文） 大強度ビームライン用高精度大立体角光学システムの研究開発
 研究課題名（英文） Development of high-precision large-solid angle optics system for high intensity beamline
 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・助教
 研究者番号：20373186

研究成果の概要（和文）：本研究では、大強度ビームなどの極限放射線場においても動作する、高精度で大立体角を持つ光学システムを開発した。この光学システムを利用することで、医療用、研究用を問わず光を利用するビームモニターである OTR や ODR、放射光やシンチレーション光などの高精度で高効率な観測をメンテナンスの負担を軽減して行うことが可能になる。また研究の際に得られたノイズや特性についてのデータは他のモニター開発にも有用である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a high-precision and large-solid angle optical system which can be operated under an extremely high radiation field such as a high intensity accelerator beamline. You can apply this system to any beam profile monitor detecting light such as OTR, ODR, synchrotron radiation, scintillation radiation, and so on with small maintenance work not only for scientific research, but also for medical use. An important experimental result observed in this research such as a background source and a beam response feature will be applicable to the other monitor development.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術、大強度陽子ビーム、ビームプロファイル測定

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、陽子ビームに

対する渴望が日に日に高まってきている。基礎物理分野においては、素粒子の崩壊、振動実験などによる対称性の破れや世代間混合を

観測することによる標準理論の精密検証が大きなトピックスとなっており、核物理分野では物質の質量起源やハドロンの構造を解き明かす実験が盛んに実行されてきている。更に、加速器で作られる放射光、中性子、中間子、重粒子等を用いて、物性の研究および新材料の開発研究などの産業利用から、がん治療などの医学利用に到るまで広範な分野で、大強度ビームはいまや欠かすことのできないツールとなってきている。このような大強度ビームを安定して供給するために、ビーム状態を正確に連続的に診断するビームプロファイル検出器の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでにない高精度で高効率な光学システムの研究開発を行うことである。近年各地で開発、利用されている大強度加速器を安全かつ確実に運転するためには、ビーム状態を正確かつ連続的に診断するビームプロファイル検出器が必須である。このプロファイル観測の際に加速器の大強度化に伴い大きな問題となってきているのが、極限放射線場下におけるメンテナンス性の確保およびバックグラウンドの増大に関する問題である。私は平成17, 18年度に科学研究費補助金(課題番号 17740169)を受け、極限的熱放射線場でも使用可能なOTR(Optical Transition Radiation)光を用いたプロファイルモニターを研究開発した。しかし、ビーム取り出し機器や標的まわりなど必ずビームロスが発生するポイント近辺のプロファイルを測定するには、モニター自身で発生する放射線やバックグラウンドを最小化するだけでは不十分である。つまり周辺で発生する膨大なバックグラウンドや放射線の影響を受けずに、高精度で効率よく観測できる光学システムが必要不可欠となる。従来の光学は高精度に焦点を絞ったものが大半であり、高放射線場化で高効率を目指す本システムは、従来とは全く異なる新しい発想に基づくものでなくてはならない。本研究では、高精度でかつ大立体角の光学システムを新規開発し、様々な極限条件下での

ビームテストを行って実用段階まで持っていく。

3. 研究の方法

まず、光学系の選定を進めた。OTR光の角度分布とMARSなどのシミュレーション等によって得られるビームロス分布、現実的な望遠主鏡の口径の3つの要素を考慮して最適な作動距離と口径を決定した。

つづいてZEMAXなどの光学シミュレーションによって光学系の最適化を行った。光学の種類としては大きく分けて屈折系と反射系がある。反射系は表面鏡を利用することでほとんど無限の放射線耐性を持つこと、および大口径でも光量損失が少ないこと、大口径のものを入手しやすいことにより、反射鏡を採用した。また今回我々は、収差を打ち消しあうように複数の反射鏡を用いて、高精度な光学を設計した。更に反射鏡にも大きく分けて軸外し(Off-Axis)系とそうでないもの(On-Axis)に分けられる。Off-axis系はある程度暗くなるが、副鏡の影響がないため減光がなくいわゆるDiffraction Limitedな良像が得られるという特徴がある。しかし、測定対象の範囲がイメージ面より大きい場合は周辺光線の精度が著しく低下するため今回はOn-Axis光学を採用した。

以上の評価によって試作機を設計製作した。その後、レーザーコリメーションによって主鏡など光学コンポーネントのアライメントを正確に調整した。試験標的を用意し分解能、3次収差などの実際の光学性能を測定し、シミュレーション結果と比較した結果、設計精度を満たしていることを確認した。

続いてこの光学システムを、実際にJ-PARC陽子ビームライン施設にインストールした。まず新規光学を入れる暗箱および架台を製作し、次にOTR光を光学システムまで伝送するトランスポート用光路を製作した。前回開発したOTR検出器と、今回新規開発した光学系を上記トランスポート用光路で接続した。再度全系の光学性能を測定し、問題ないことを再確認した。

以上により新規光学システムを搭載した OTR 検出器群が完成した。実際にビームを使用して、検出器のトータルでの分解能、S/N、ビーム応答などを測定した。また、前回の研究において得られた旧光学系のデータ、およびシミュレーション結果と比較、考察し、バックグラウンドについてのより深い知見が得られた。また機器の放射線劣化を測定し、計算予想と比較評価した。

4. 研究成果

- (1) 光学計算ソフト ZEMAX により 2 枚反射鏡を含む光学およびイメージ増幅器 (IIT) からイメージ面までのリレー光学を最適化した。これにより分解能を損なうことなくメンテナンス性にすぐれた光学を得ることができた。
- (2) 組み上げた光学の分解能をスクリーン法およびハルトマン法で評価し、お互いに矛盾のない結果を得た。
- (3) 光学と OTR チェンバーを組み合わせ構築した OTR 検出器群を大強度陽子ビームラインである J-PARC ハドロンビームラインにおいてビームテストを行った。これによって、強い放射線場においてもチェレンコフバックグラウンドがほとんどない良像を得ることに成功した。また機器の放射化の問題を劇的に改善することにも成功した。
- (4) 上記ビームテストにおいて従来型モニターである蛍光スクリーンモニターとの比較を行った。ビーム位置に関してよく再現することを確認した。またビーム幅に関しては、光学による増分や上流膜による増分で説明ができることを証明した。
- (5) 上記ビームテストにおいて、ビーム強度を変えながら測定を行い、よい線形応答性を持っていることを確認した。また、スピル当たり 1×10^{11} 個という極めて低強度においても IIT と S/N の良い光学の恩恵で問題なくプロファイルが測定できることを確認し、高い測定効率を証明

した。

- (6) 以上の成果によって、高精度、高効率で耐環境にすぐれた光学が完成した。この光学は、放射光や OTR、蛍光スクリーンなどはもちろんのこと、微弱光を利用する ODR やガスシンチレーションを利用したモニターにも有用である。今後ますますビーム強度が増大すると予想されるため、更に本装置の重要度が増すと考えられる。
- (7) 今後の展望に関しては、更に分解能を向上することが考えられる。反射鏡 2 枚の離心率を微調整し、IIT からのリレー光学を工夫することで現在の精度をさらに 1 桁向上することができると考えている。

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① A. Toyoda 他 19 人中 1 番目、First light for optical transition radiation monitor at the J-PARC、Proceedings of DIPAC 2009、査読無、TUPD33、2009、pp372-374
- ② A. Toyoda 他 21 人中 1 番目、Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline(3)、第 5 回日本加速器学会年会報告書、査読無、Vol 5、2008、pp 304-306

[学会発表] (計 2 件)

- ① 豊田 晃久他 19 人中 1 番目、J-PARC ハドロンビームラインにおける OTR ビームプロファイルの初観測、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学津島キャンパス
- ② 豊田 晃久他 19 人中 1 番目、J-PARC ハドロンビームライン用 OTR ビームプロファイルモニタの開発(4)、第 6 回日本加速器学会年会、2009 年 8 月 5 日、原子力科

学研究所

6. 研究組織

(1) 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・助教

研究者番号：20373186