

氏 名 矢野 喜治

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大乙第 227 号

学位授与の日付 平成25年9月27日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 大口経光ファイバの加速器への応用

論文審査委員 主 査 教授 福間 均
准教授 帯名 崇
准教授 道園 真一郎
客員教授 福田 茂樹
グループリーダー 花木 博文

高輝度光科学研究センター

論文内容の要旨

Summary of thesis contents

ガラスファイバに光を通し通信を試みることは1900年頃から始まっているが、その後の改良と新しい製造方法により、通信用だけでなくレーザー分野への応用や光ファイバの特性を利用した測定器の開発が進展している。加速器のビームモニタやセンサとしてもこの新技術の応用が試みられており、これまでに、ビームラインに沿った大局的なビームロス分布の測定やビームプロファイル測定用のセンサとして用いられた例が報告されている。光ファイバを用いた粒子検出器の測定原理は、ビームロス等で生じた粒子が光ファイバを通過したときに発生するチェレンコフ光をファイバ端の光検出器で測定し粒子位置と強度を測定するものである。

加速器で用いられるビームロスモニタ等の測定装置の現状をみると個々の装置毎に個別の検出器（センサ）が設置されている。しかし、元となるモニタの測定原理は共通でありいずれの検出器も電子等から発生した電子や光をモニタしている。もし光ファイバをセンサとして用いれば、光ファイバは連続した線であり広範囲に分布したセンサとしての機能を果たすので、局所的に個別に設置するセンサを光ファイバに換えることにより複数の測定装置のセンサを共通化できる可能性がある。

本論文では一本の光ファイバを布設することによりビームロスモニタ、ワイヤスキャナの粒子検出器、加速管のフィールドエミッションのモニタとしての使用が可能であるとのアイデアに基づき、個別のモニタの機能を評価する実験を高エネルギー加速器研究機構(KEK)の電子加速器で行なった。

ビームロスの位置を求める測定原理は時間差法による。ビームロスで生じた荷電粒子が光ファイバを通過するとチェレンコフ光が放出され、チェレンコフ光は光ファイバ中をファイバ両端に向かって伝搬する。ファイバ両端に光検出器を置き、両端で検出された信号の時間差を測定すればビームロスが起こった場所が特定される。光検出器に光電子増倍管(PMT)を用いた場合、PMT信号の時間分解能から推定される位置分解能は10cm程度である。

実験には検出体積を上げて検出器感度を上げるためコア径 400 μm ~800 μm の光ファイバが用いられ、その材質には放射線による透過性の悪化を避けるため純粋石英ガラスが使用された。また、光検出器には検出器感度を上げるため PMT が用いられた。PMT の分光感度特性は波長 400nm 付近にピークを持つ。

実験の主要部は、ビームロスモニタおよびワイヤスキャナのセンサとしての光ファイバ検出器の機能評価である。

ビームロスモニタに関しては、入射器でのビームロス、入射器からKEKフォトンファクトリ(KEK-PF)リングへのビーム輸送路でのビームロス、KEK-PFリングでのビームロスの測定が行われた。光ファイバ中の光の速度はファイバ端での反射を利用して較正された。入射器でのビームロス測定では、測定で求めたビームロスの場所が残留放射能の高い場所と一致することが示された。また、ビームの調整状態によるビームロスの変化が実時間で観測でき、このモニタがビーム輸送の調整に有用であることが示された。入射器からKEK-PFリングへのビーム輸送路でのビームロス測定では、2本の光ファイバをビームダクトの両側に密着して測定が行われ、ビームロスの場所が特定できることが示された。またビームロスのビーム輸送路に沿った分布は熱ルミネセンス線量計(TLD)による測定とほぼ

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

一致することが示された。KEK-PFリングでのビームロスの測定では入射方式の違いによるビームロスの違いが観測された。また、ビーム周回毎のビームロスが測定できビームロスの時間構造が入射時のベータートロン振動で説明できることが示された。

ワイヤスキャナに関しては、光ファイバをワイヤスキャナのセンサとして使用する測定が行われた。ワイヤスキャナでは、ビーム軌道内に100 μm 程度のタングステンワイヤを入れビームとタングステンの相互作用によって放出される制動輻射による γ 線を測定する。従来は γ 線の検出器に局所的に置かれたPMT検出器が用いられてきた。ワイヤスキャナをビーム横方向断面に沿って移動させPMT信号の変化を観測することでビームサイズが測定できる。光ファイバをセンサとした本実験では、制動輻射による強い信号が四極磁石の内で観測された。この信号は、 γ 線の当たる場所が四極磁石内であることとPMTは磁場に敏感であることから、従来のPMT検出器では観測不可能である。この信号を使うことで従来のPMT検出器による測定と比べて約2.5倍のSN比の向上が認められた。また、信号の時間差によって、ビームロス信号とワイヤスキャナによる信号を区別できることが示された。光ファイバは広範囲のビームロスを検出できるためビームエネルギーの違いによる信号検出最適位置の変化にも対応できるであろう。

また、光ファイバ検出器応用の副次的な実験として、1)光ファイバロスモニタを線形加速器加速管のフィールドエミッションによる電子の測定に適用し、フィールドエミッションを起こしている加速管を特定できること、2)光ファイバ検出器を加速空洞の高周波窓やカプラで起きる放電を検出するためのアークセンサとして使用し、放電前の微弱な発光現象を電気信号として観測することに成功したことが示された。

以上の実験は、光ファイバがロスモニタ、ワイヤスキャナの制動輻射センサあるいはフィールドエミッションモニタの空間的に連続したセンサとして有効であり、光ファイバの配置場所に考慮を払えば、一つの光ファイバシステムを複数の測定装置の共通化されたモニタとして利用可能であることを示している。今後この研究を進めれば、光ファイバを用いた測定装置が加速器のビーム調整や加速器の機器およびビーム状態の監視のための有用なツールとなることが期待できる。

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文の研究は、大口径光ファイバと光電子増倍管(PMT)の組み合わせによる光検出器（以下では光ファイバ検出器と称する）を加速器に適用する可能性について種々の提案を行い、それらをKEKの電子加速器で実証したものである。光ファイバ検出器では、ビームロス等で生じた粒子が光ファイバを通過したときに発生するチェレンコフ光をファイバ端の光検出器で測定し粒子位置と強度を測定する。一本の光ケーブルで広い領域をカバーできるため敷設が容易で安価な粒子検出システムを構築できる。光ファイバを加速器のビームロスモニタとして用いることは2000年代から行われてきたが、本研究は、これまでの研究をふまえ、単一の光ファイバセンサーシステムを複数の用途に使用する可能性を探る研究となっている。具体的には、光ファイバ検出器を開発し以下の研究を行った。

1. 光ファイバ検出器をビームロスモニタとして用いビームロス源の特定に使用できることを種々の例によって示した。また、蓄積リングにおいてはビームロスのターン毎の観測にも使えることを示した。特にビームロス源の特定について、例えば磁石中のビームロスをも測定できるように、光ファイバをビームダクトに密着して使用することの重要性を指摘した。
2. 光ファイバ検出器をワイヤスキャナによるビームプロファイルの測定のためのセンサとして使用し、従来のPMTセンサに比べて信号対雑音比が向上することを示した。その理由は、従来のPMTセンサは局所的なモニタでかつ磁場に影響されるためワイヤからの信号をモニタする場所が制約されるが、光ファイバ検出器では磁石中を含め広い領域の信号を観測できるため強度が最大の場所の信号を使用できるからである。光ファイバ検出器を使えば、例えば、線形加速器のエネルギー変更に伴う信号の最適検出位置の変化にも柔軟に対応できる。
3. 光ファイバ検出器を線形加速器加速管のフィールドエミッション(FE)による電子の測定に適用し、ステアリング磁石や四極磁石の励磁変更による検出信号の変化を観測することでFEを起こしている加速管を特定できることを示した。

また、光ファイバ自体をセンサとして利用するのではないが、

4. 光ファイバ検出器を高周波窓やカプラで起きる放電を検出するためのアークセンサとして使用し、放電前の微弱な発光現象を電気信号として観測することに成功した。この方法により放電現象の定量的評価が可能になり、従来から行われている真空圧力の観測と併用すれば、高周波窓やカプラでの放電現象の詳細な研究を行うことができると期待される。

上記1.,2.,3.,4.共に新しい知見が含まれており、特に、1.,2.,3.により、光ファイバの配置場所に考慮を払えば、単一の光ファイバセンサーシステムを複数の用途に使用できることが示されている。今後この研究を進めれば、光ファイバ検出器が加速器のビーム調整や装置およびビーム状態の監視のための強力なツールとなることが期待される。

以上により、審査委員全員が、矢野喜治氏の研究内容は博士論文に値すると判断した。