博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏 名 皿谷 有一

学 位 博士(理学)

学 位 記 番 号 新大院博 (理) 第382号

学位授与の日付 平成26年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

博士論文名 陽子線断層撮影におけるシリコンストリップ検出器を使用した

空間分解能と電子数測定の研究

論文審査委員 主査 教 授・宮田 等

副査 教 授・谷本 盛光

副査 教 授・山田 裕

副査 准教授・大坪 隆

副査 准教授・川崎 健夫

博士論文の要旨

本論文における研究では、近年高度化が著しい、腫瘍などの粒子線治療において治療の質の飛躍的な改善に役立つ陽子線断層撮像(PCT)に関する研究を行っている。

PCT とは人体を通過するような高エネルギーの陽子を使用した医用画像技術であり、被写体を通過後の陽子のエネルギーを測定して、通過した電子数を求める。PCT では電子数の直接測定を行うため、間接的に電子数を求める X線 CT よりも高い精度で体内の電子数分布を再構成できる。実用化にあたっての最大の課題は、物質中での多重散乱による空間分解能の低下であり、同時に吸収線量と長い照射時間も解決すべき課題である。

本研究では、高エネルギー物理学分野で開発・発展が行われたシリコンマイクロストリップ検出器を使用し粒子の飛跡を測定することで、陽子線を使用した画像診断における空間分解能を改善することを試みている。被写体の上下流で陽子の飛跡ら被写体中の位置情報を再構成することで空間分解能が改善できるか検討を行った。この方法は分解能を改善しつつ大きく散乱した粒子も撮像に使用するため照射時間の短縮においても有用な方法である。高い位置分解能と低物質量を重視し、厚さ $0.4~{\rm mm}$ 、ストリップ間隔 $0.224~{\rm mm}$ の大面積シリコンストリップ検出器 $(90\times90~{\rm mm}^2)$ を使用して飛跡を測定する陽子線測定器を開発した。エネルギー検出器には入手し易さを重視し厚さ $76.2~{\rm mm}$ の NaI シンチレーション検出器を使用した。

開発した陽子線測定器を使用し、放射線医学総合研究所の HIMAC において 160 MeV の陽子を使用しビーム実験を行った。実験の結果陽子の飛跡を測定することで空間分解能を改善できることを証明した。厚さ $25~\rm mm$ のポリエチレンにおいて $0.45~\rm mm$ の空間分解能を達成することができた。人体程度の厚み $(200~\rm mm)$ の被写体においては、シミュレーションにより、 $235~\rm MeV$ の陽子を照射した場合に $1.2~\rm mm$ と見積もった。 $1~\rm mm$ 以下を達成することはできなかったが、飛跡を再構成することで空間分解能が改善できることを確認した。

また、pCT の主目的である電子数の精密測定についても系統的な研究を行っている。電子数測定の分解能は記録される事象数やエネルギー測定分解能に依存するが、測定される電子数の"真の値"からの偏差を小さくすることも重要である。実際の測定では、人体の構成に近い材料を用いた測定を行うことによって較正を行うことが可能である。このとき、システム全体のエネルギーを測定の安定性を確認する必要がある。

本論文の研究では、NaI 検出器の増倍率の変動を他の物質で較正することにより厚さ 10 mm のアクリルの電子数を、真の値からのずれが 0.1 % と精密に再構成することができた。また、160 MeV の陽子において平均イオン化ポテンシャルの異なる厚さ 10 mm のポリエチレンとアクリルをビーム軸上で入れ替えた場合の電子数に差はなかった。このときの電子数の真値からのずれは 0.9 % であった。これらのことから、PCT では精密に電子数を求めることが可能であることが確認できた。

測定時間に関しては、データ集録回路が低速であったため、小さな撮像領域にも関わらず 1 方向の測定に 1 時間を要した。データ集録速度の高速化のためにはフロントエンド回路上で閾値をかけチャンネル数を削減することが必要である。本研究において構築した測定システムにおいて、 $160\,\mathrm{MeV}$ の陽子がシリコン検出器を通過する際の信号は $18\,\mathrm{fC}$ であり、各ストリップのノイズは $0.2\sim0.5\,\mathrm{fC}$ 程度であった。そのためこのシリコン検出器において回路を使ってシグナルを弁別することは十分に可能であり、将来データ収録速度を飛躍的に改善したシステムを構築するために、シリコン検出器を用いることが原理的に可能であることを示した。

これらの結果を考察し、陽子線断層撮影は、将来の粒子線治療の高度化に対して有効であることを示した。

審査結果の要旨

本申請の博士論文における研究は、素粒子物理学実験において開発された粒子測定技術を、臨床医学という分野へと応用することを目的としたものである。

この目的のため申請者は、まず陽子線断層撮像(PCT)を行うことによる、粒子線治療において得られる治療の改善、現時点での問題点や改良すべき点などについて検討を行い、pCTを行うために必要とされる個々の測定器の性能を検討し、シミュレーションなどにより実現すべきシステムの概要を示した。

そして、実際に必要な性能を持つ測定器を開発し、データ集録速度以外の要求される仕様を満たす PCT システムの構築を行った。このシステムと、がん治療用陽子線ビームを用いて陽子線断層撮像(pCT)を実施し、その性能を定量的に評価した。また、新しいデータ解析手法の提案により位置分解能の改善を行うことを試み、実際にその性能を確認した。

これらの研究に得られた結果より、実際に臨床現場で使用するために必要とされる問題点・改善点などについても考察を行った。また、データ集録を改善する方法に対する可能性についても言及している。これは、将来の実用化を視野に入れた現実的な成果である。

このように、素粒子物理学の基礎研究のために開発された測定技術を、学術分野の垣根を越えて、社会に必要とされる学際的な分野に応用することは、自然科学分野全体への貢献として非常に価値ある研究であると評価できる。よって、本申請論文は博士(理学)の学位論文として十分に値すると判定した。