

氏 名 津田 修一

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1377 号

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 重荷電粒子線のマイクロシメトリを目的とした
Wall-less 型組織等価比例計数管の開発に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 伴 秀一
教授 佐々木 慎一
教授 平山 英夫
教授 榎本 和義
准教授 波戸 芳仁
主任研究員 高田 真志
(放射線医学総合研究所)

放射線は原子力発電等エネルギー分野だけでなく、工業、農業、医療等様々な産業において利用されている。近年では、航空機による高高度飛行時、放射線を利用したPET等の診断、また粒子線によるがん治療、宇宙における長期滞在等、放射線の人体への影響に関する関心は高まっている。これまで生物影響に関する研究が多く行われ、その知見は放射線防護等だけでなく近年の積極的な放射線利用に役立っている一方、重荷電粒子線による生物影響は、放射線の種類、エネルギーだけでなく、細胞の種類・状態によって異なる修復機構等、複雑な因子によって発現の仕方が異なるため、細胞・DNAレベルでの放射線の生物影響については十分解明されていないのが現状である。

Rossiらは等しい吸収線量の放射線を照射した場合に、観察される生物効果が異なることに着目し、放射線の種類によって付与されるエネルギー分布が異なることを示した。そして細胞程度のマイクロメートルサイズの領域内におけるエネルギー付与分布を測定する手法を開発するとともに、エネルギー付与の平均量である吸収線量ではなく、エネルギー付与分布に着目したマイクロシメトリの概念を提案した。

核子当たり数 100MeV の高エネルギー重荷電粒子は、生体組織内を通過する際に、その飛跡上から離れた位置にまでエネルギーの一部を付与可能な高エネルギー電子(δ 線)を多数生成する。Chatterjeeらの理論によると、半径 10 ナノメートル以内に付与されるエネルギーは、重荷電粒子の入射エネルギーの約 50%であり、残りのエネルギーは、飛跡から離れた場所に付与される。また細胞内のDNAにエネルギーを付与して、直接的に損傷を引き起こすのは最終的には電子であるため、重荷電粒子による生物効果を細胞・生物照射実験データに基づいて評価するためには、重荷電粒子の入射エネルギーに対する線エネルギー付与(LET)の情報だけでなく、標的近傍の δ 線を含めた詳細なエネルギー付与分布情報を必要とする。そこで本研究は、高エネルギー重荷電粒子によるマイクロメートルサイズの領域内のエネルギー付与分布を測定可能な、壁なし型の組織等価比例計数管(Wall-less Tissue Equivalent Proportional Counter, 以下「Wall-less TEPC」という)を製作し、高エネルギー重荷電粒子を用いた性能評価を行った。信号検出部を構成する固体材料と重荷電粒子との相互作用で生成される δ 線の寄与を減らすために、Wall-less TEPCの信号検出部は、直径 100 μm の極細ワイヤーを用いたらせんで構成される。そのため、一般のTEPCと比較して、固体材料からの影響を小さくできるため、Wall-less TEPCは、 δ 線を含めた重荷電粒子のエネルギー付与を測定することができる。

Wall-less TEPCの設計においては、信号検出部内の電場分布計算、 δ 線によるエネルギー付与を推定するためのモンテカルロシミュレーション計算結果を参考にした。製作したWall-less TEPCの印加電圧特性、ガス増幅率、エネルギー分解能の評価には、 $\text{Cm-244}\alpha$ 線源を使用して行った。また高エネルギー重荷電粒子照射実験の前後には、エネルギー校正とし

て、 α 線源を用いた測定を実施した。核子当たり数 100 MeV の種々の重荷電粒子に対する波高分布データに基づき、線エネルギー分布 (y 分布) データを得た。ガス内で生成される δ 線の事象を計測することが困難な一般の TEPC を用いた y 分布データと比較することによって、高エネルギー重荷電粒子に対するマイクロシメトリにおける Wall-less TEPC の有用性を明らかにした。またマイクロシメトリ用の計算コードによる計算結果と比較するとともに、y 分布の線量平均値を算出し、飛跡から逃れるエネルギー割合について考察した。

本研究で開発した Wall-less TEPC は、様々な実験照射ポートで利用できる汎用性を有しており、細胞照射実験等におけるエネルギー付与分布及びその平均値を得ることが可能である。核子当たり数 100MeV の重荷電粒子を用いた生物照射実験を行える施設は世界的にも限られており、現時点における報告例は多くないが、高エネルギー重荷電粒子の生物学的効果の解明に関して、物理・工学的観点から貢献することができる。

本論文は以下のように構成される。第 2 章では、重荷電粒子によるマイクロシメトリについて述べる。第 3 章では、Wall TEPC 及び Wall-less TEPC のレスポンスを理解するための解析モデルについて述べるとともに、シミュレーションによる Wall-less TEPC 及び Wall TEPC のレスポンス計算について述べる。第 4 章では、Wall-less TEPC の設計及び製作、 α 線源を用いたガス増幅率等の基礎的な特性評価、及び放射線医学総合研究所がん治療装置 HIMAC で行った種々の重荷電粒子に対する実験について述べる。第 5 章では、種々の重荷電粒子に対する測定結果及び考察、シミュレーション計算との比較について示す。第 6 章において、本研究で得られた成果を総括する。

博士論文の審査結果の要旨

重粒子線は放射線治療に用いられているが、人体組織を通過中にエネルギーの一部を高エネルギー二次電子 (δ 線) として失う。そのため生物効果を評価するためには、 $1\mu\text{m}$ の細胞程度の大きさの領域に、重粒子線の飛跡とその近傍が与えるエネルギー付与分布を必要とする。中性子やガンマ線によるエネルギー付与分布の測定には元素組成が人体組織に近いプラスチック壁とガスを封入した比例計数管が、使われてきた。これを重粒子線にも用いた場合は、固体とガスとの密度差の影響や壁からくる δ 線の影響が大きい。壁・入射窓の影響を避けて、ガスの中央部の微少な領域でのエネルギー付与のみを測定するWall-less型組織等価比例計数管は、大型で実用的なものは無く、鉄イオンに対する測定例が、1例、あるだけである。

津田修一氏は、壁・入射窓の影響を減らすため、生成した δ 線の輸送シミュレーションを0.1 keV まで行ない、これによって何を小型化できるか検討した。初めて実用的なWall-less型組織等価比例計数管を作成し、放射線医学総合研究所がん治療装置HIMACで、電極の構成の異なるものをテストした。治療に用いられている炭素線の飛跡中のデータは、壁有りの検出器では測られていたものの、Wall-less型では初めてのデータを取得した。今までのデータは飛跡部と壁からの δ 線が重なって測定されていたことを、初めて示した、氏の研究の意義は大きい。

炭素線のデータは、Phys. Med. Biol. 誌にすでに発表されている。検出部の周りの構造の影響評価は、Radiation Protection Dosimetry 誌で査読中であるが、基本的にはアクセプトとの評価を得ている。国際会議での英語での発表も1件あり、英語の能力についても充分である。

予備審査の時に残っていた検出器開発の到達点を明瞭に書くことと、実験での精度検証も行われた。160MeV陽子線、150MeV/uヘリウム線、500MeV/uアルゴン線の測定結果を追加して、2時間の口述試験も行ったが、論文に含まれる放射線測定、放射線影響、高エネルギーの放射線の挙動の専門知識、関連分野における基礎学力等も有していることから、資質を十分有するものと判断した。

重粒子線が微少領域に与える線量を周りの影響無しに測る、小型で実用的な検出器を初めて製作し、陽子線からアルゴン線まで測定できることを示した意義は大きく、これらのことより、審査委員全員において本審査合格との判断を下した。