

審査の結果の要旨

氏名 山下 真一

本研究はがん治療に使用される GeV 級エネルギーの重粒子線を中性水溶液に照射し、放射線分解で生ずる生成物の収量測定を行い、さらにシミュレーション計算と比較して、粒子の飛跡に沿って形成されるトラック構造の検討を行ったものである。

論文全体は七章からなっており、第一章は序論である。最近、ガンの重粒子線治療が効果的であることが明らかとなり、新たな治療施設が建設されている。重粒子の放射線作用の特徴を明確にするためには、生体の 60-70% を占める水の放射線分解の理解が必須であり、放射線分解実験と理論計算の比較を通じて重粒子による放射線分解の特徴を明確にすることが重要であることから、これを本研究の目的としたことが述べられている。

第二章は重粒子線照射実験について述べている。照射には放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC で発生される 150 から 500 MeV/u の最大エネルギーを持つ GeV 級重粒子線 (${}^4\text{He}^{2+}$ 、 ${}^{12}\text{C}^{6+}$ 、 ${}^{20}\text{Ne}^{10+}$ 、 ${}^{28}\text{Si}^{14+}$ 、 ${}^{40}\text{Ar}^{18+}$ 、 ${}^{56}\text{Fe}^{26+}$) を用いた。対応する LET は 2.2 から 185 eV/nm であり、エネルギー吸収材を使用して、さらに 700 eV/nm まで広げた。線量率は 2-12 Gy/min で、線量は 20-600 Gy の範囲で変化させている。

水分解ラジカルとの反応性が高い捕捉剤を用い、水分解ラジカルを安定で定量が容易な生成物に変換した。捕捉反応は擬一次反応となり、起こる時間スケールは速度定数と捕捉剤濃度の積である捕捉能 (scavenging capacity) で決まる。この逆数が捕捉反応の起こる時間スケールに対応するので、本研究では捕捉剤濃度を調整することで反応時間スケールを調整している。この手法によりトラック反応の時間挙動を評価する。生成物は吸光分析により測定し、収量を算出した。

第三章は本研究で使用した二種のシミュレーション、すなわち決定論的な「拡散モデル計算」と統計的な「モンテカルロ計算」を紹介している。両者は必要に応じて使い分け、相互に比較し、各シミュレーションの特徴の検討も行っている。後者のシミュレーションには共同研究として実施したカナダのシャープブルック大学で開発されたものを用いている。

第四章は水分解生成物の一次収量の測定結果と計算の比較を述べている。水分解生成物である水和電子 (e_{aq}^-) と OH ラジカルは同一の重粒子の場合、横軸を LET、縦軸を収量でプロットすると、LET が増加するに従い収量は減少するが、その曲線は大きな質量を持つ重粒子ほど右にシフトする。一方、過酸化水素 (H_2O_2) は LET の増加に応じて増大し、いずれの結果も LET の増加に対応してトラック反応が激しくなることを反映している。これらの実験結果はモンテカルロ計算で非常に良く再現できる。これによりモンテカルロ計算の精度がかなり高いことが判った。さらに、LET の代わりに重粒子の有効電荷 (Z_{eff}) と速度 (β)、すなわち二次電子のエネルギーを考慮したパラメータとして $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2$ を LET の代わりに使用すると、別々の曲線群で表されていたものが一つの曲線で表せることを見出している。

第五章はメチルビオローゲンとギ酸を含む水溶液で 6 種の重粒子を用い、ギ酸の濃度を变化させたときのメチルビオローゲンラジカルカチオンの収量を測定した結果を述べてい

る。横軸をギ酸濃度、縦軸をカチオンの収量でプロットすると、高ギ酸濃度ほど収量は増加し、測定点はほぼ直線に乗り、その直線は重い重粒子になるほど低い位置にシフトする。これは高濃度ほど短時間の捕捉をするために収量が増加すること、重い重粒子ほどトラック反応が激しくなり、収量が減少することで定性的に説明は出来るとしている。定量的に議論するためにモンテカルロ計算をしたところ、実験結果をかなり精度良く再現できることが判った。さらに、この計算を詳細に検討し、短時間で進行する反応は空間的に接近した領域で進行することから、DNA のクラスター損傷の量と結びつけられ、これにより RBE の特徴を説明できることを示した。このような定量的な計算の基づいた RBE の説明は世界で初めてである。

第六章は拡散モデルによるトラック構造の検討を行っている。これまでに気相でのイオン化収率の実測により提案されたトラック構造のモデルは幾つかあり、モンテカルロ計算で得られた分布と比較して、重粒子の飛跡近傍ではモデル毎に差があるが、離れると良く一致する。これらの分布を仮定して拡散モデルに基づいた計算を行い、実験結果を再現できるか検討した。いずれのモデルのシミュレーション結果も、実験による一次収量測定値と比較すると、ラジカル収量では過大評価され、分子収量では過小評価される。このことから、提案されたトラック構造モデルはトラック内反応を少なく見積もってしまうことが分かった。この原因は、いずれのモデルも飛程の長い高エネルギー二次電子の寄与がトラック周方向で希釈されるためとしている。

第七章では本研究で得られた知見をまとめて結論を述べている。

以上より、本研究は HIMAC からの 6 種のガン治療用 GeV 級重粒子線を用い、これまで知見がほとんど蓄積されていない中性水溶液の放射線分解収量測定を行い、これと並行してトラック内反応シミュレーションを行うことにより、重粒子により形成されるトラック構造の時間的、空間的な描像を得て、放射線科学、特に重粒子の化学作用の理解に極めて大きな成果をもたらしている。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。