

低エネルギー陽子飛跡構造コードにより導かれる種々の物理量

(九州大院・理¹, 福岡大学病院²)○高 弁¹, 馬田 省吾¹, 上原 周三²

【緒言】

重粒子線によるがん治療の基礎研究及び臨床における治療はすでに各所で広く行われている。現在、重粒子イオン治療で用いられるイオン種は、原子番号 $1 \leq Z \leq 6$ のイオンである。陽子線やアルファ粒子線は電子線や X 線などと同様に低 LET 放射線に分類され、He イオンより重いイオン種が高 LET 放射線とされている。重粒子線治療には入射エネルギーが 300MeV/u の重粒子が用いられる。このエネルギーで直接的に細胞に損傷を与え治療効果向上を目指している。重粒子イオンでは深部線量分布において入射直後及び飛程直前までは線量付与が小さく、ある一定の深度に達したとき著しく大きくなる Bragg peak と呼ばれる領域があり、さらにこれより深いところで、粒子は完全に停止する。一方、X 線などでは入射直後の生体表面に最大の線量付与を示し、その後生体内部に侵入するに従い徐々に与える線量が小さくなる。入射イオンそのものによるエネルギー付与よりも、標的のイオン化による放出 2 次電子によるエネルギー付与の割合が重要である。一般に高 LET 放射線の効果は入射放射線と生体構成分子、特に DNA との直接的反応による分子変異や破壊が主な過程で、低 LET による効果は、放射線と生体内部の水分子などとの反応により生成されたラジカル種と DNA との反応、間接反応が大きな割合を占めると考えられている。つまり、直接的な物理段階だけでなく、この低エネルギー領域で起こる化学段階まですべて考えて DNA 損傷機構を考える必要がある。これらの過程の詳細な知見は重粒子イオンを用いたがん治療の計画とコントロールの向上に役立つと考えられるので、今後の総合的かつ組織的研究が必要である。

【理論モデル】

重イオンコードに至る前段階として、今回我々は陽子照射による衝突反応過程すべてを考慮し、その断面積データを下にモンテカルロシミュレーションを行った。陽子-水分子衝突の素過程データのうち、新たに求めたのは電子移行断面積である。今まで実験及び理論データの無かった数百 eV 以下の入射エネルギーにおける電子移行断面積を考えるに当たって、最近発表された結果^[1]に加えて、さらに低エネルギー範囲については全量子散乱理論を用いて計算を行った。電離断面積及び 2 次電子スペクトルは実験値及び Rudd 理論に基づいて求めた。また、弾性散乱過程については古典力学軌道計算を用いて計算した。さらに励起断面積とエネルギー移行については実験値にフィッティングするため、Miller-Green モデルを用いて理論計算を行った。

【結果】

今回我々は 10.1eV~400keVの低い入射エネルギーの陽子が水分子へ入射した場合の挙動解析を行った。上原らの開発したモンテカルロシミュレーションコードの LEPHIST^[2]をエネルギー範囲 10.1eVまで拡張して計算を行った。入射粒子によるイオン化や電子捕獲過程により 2 次電子が放出され、これら 2 次電子も放射線過程に加わる。そのため、2 次電子の効果も厳密に低エネルギー領域まで取り入れてシミュレーション計算を実行した。さらに生成した飛跡構造データを用いて種々のモデル計算を行い、深さ方向の線量分布(Fig.1)や、W値（1つのイオン対を作るのに必要な平均エネルギー）、飛程、阻止能などの陽子入射における様々なダイナミクスを理解するうえで必要な物理量を導いた。

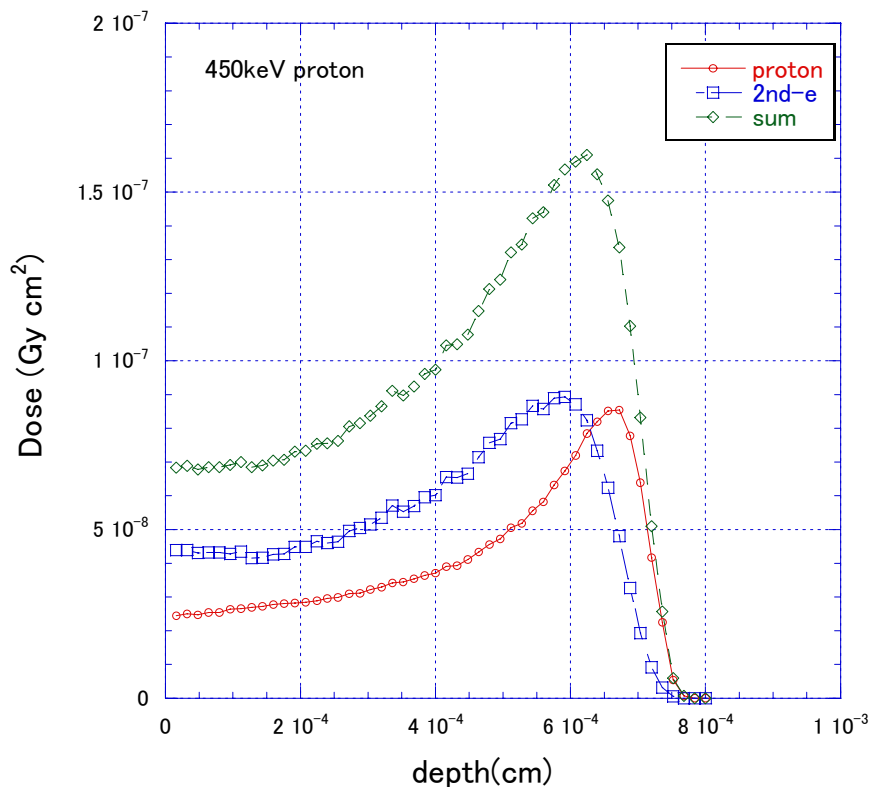


Fig.1 Depth-dose curve for 450keV protons.

【参考文献】

- [1] S. Mada et. al. *Phys. Rev. A* **75**, 022706 (2007)
- [2] S. Uehara et.al., *Int. J. Radiat. Biol.*, **77**, 139-154 (2001)