

4P066

モンテカルロシミュレーションを用いた水分子へのプロトン入射における挙動解析

(九州大院・理¹, 九州大院 医・保健²)

○高 弁¹, 馬田 省吾¹, 季村 峯生¹, 上原 周三²

【序論】

現在、重粒子線によるがん治療の研究は広く行われており、実際に重粒子線を用いた治療はすでに行われている。重粒子イオン治療で用いられるイオン種は、陽子より大きいすべてのイオンを含むが、陽子線やアルファ粒子線は電子線やX線などと一緒に低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。重粒子線治療に用いられる重粒子は300MeV/uのエネルギーをもって入射されており、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X線などと違い、線量分布において入射直後では線量付加が低く、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加を示し、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。しかし、粒子エネルギーが数MeVから数百keVまで減少すると、直接的な細胞へのエネルギー付与ではなく、標的からのイオン化による2次電子放出がおきこれら放出電子による放射線効果も重要である。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。

【理論モデル】

我々は粒子照射による衝突反応過程すべてを考慮し、その衝突データを下にモンテカルロシミュレーションを実施した[1]。今回新しく陽子衝突の素過程データについて、いま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での水-プロトン衝突過程における電子移行及び電子励起断面積について、最近発表されたもの[2]及びさらに低エネルギー範囲について、全量子散乱理論を用いて計算し、反応閾値まで外挿した。得られた電子捕獲・電子励起断面積の結果を図1に示す。図中で $1 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ より大きな値を示している実線は我々の電子捕獲断面積を表し、急激に減少している実線は我々が求めた電子励起断面積を表している。

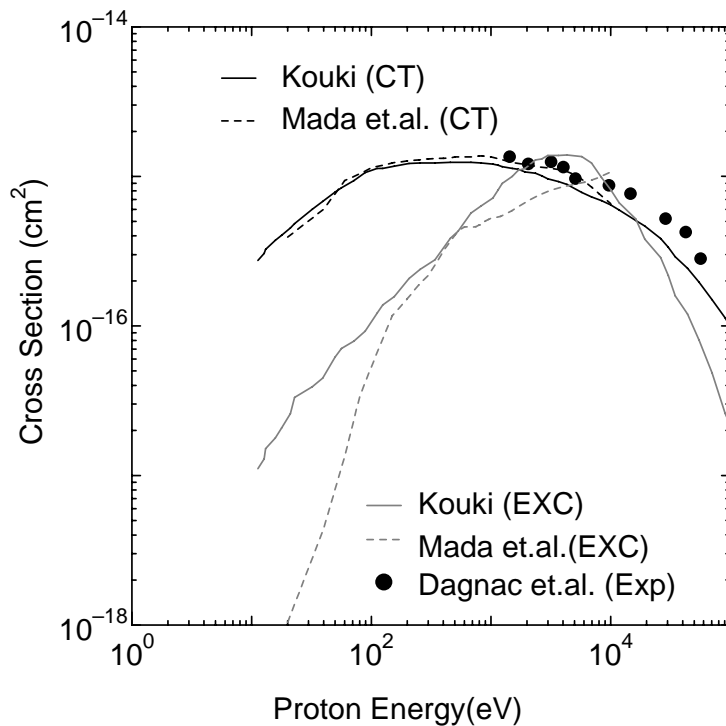


図1 用いた電子捕獲・電子励起断面積

【結果】

モンテカルロシミュレーションを用いると、放射線の生物作用を理解できるエネルギー付与の時間的、空間的分布や個々の電離や励起による分子の初期のスペクトルが分かる。また、放射線飛跡に沿って、これらのイベントの数などの詳細が分かる。今回我々は 400keV 以下の低エネルギープロトンが水分子へ入射した場合の挙動解析のために、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[1]を用いて計算を行い、シミュレーションのエネルギー範囲を 10.1 eV の低エネルギーまで拡張した。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参加するが、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シミュレーション計算を実行した。

モンテカルロシミュレーションコードを用いて、エネルギー付与や入射粒子の軌道や二次電子の二次元表示した物理飛跡構造を知ることができ、医療計画の基礎を提供することができる。

【参考文献】

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