

組織等価電離箱を用いた 熱外中性子線量測定上の反跳非電離反応の影響

京都大学原子炉実験所

古林 徹、櫻井 良憲

e-mail: kobato@rri.kyoto-u.ac.jp

1 はじめに

京都大学研究用原子炉(KUR)の重水熱中性子設備は、平成8年3月に全面的な改修を終了した。改修では、(1)設備の安全性、(2)中性子捕捉療法用の医療照射場としての性能、(3)医療照射時の使い勝手の向上を主目的にした。中でも医療照射やそれに関する基礎実験の高度化に関して、従来熱中性子だけの利用であったものを、中性子エネルギースペクトル及び熱中性子フィルターを用いることにより、熱中性子と熱外中性子及びこれらの混合状態の利用を可能とした。また、KURを定格出力で連続運転中に、医療照射や大型の試料を用いた実験を可能とすることにより、使い勝手の大幅な向上を実現した。

中性子捕捉療法の分野では、深部の腫瘍の治療に適している熱外中性子が着目されてから、中性子をエネルギーによって、熱中性子、熱外中性子、高速中性子に分類している。我々は、熱と熱外及び熱外と高速中性子の境界のエネルギーをそれぞれ0.6eVと10keVとしている。熱外及び高速中性子による生体に対する物理的な吸収線量を測定する方法の一つに、対電離箱法がある。この方法は中性子およびγ線の双方に対して生体に近い感度を持つ組織等価電離箱(TEC)と、中性子に感度が低い電離箱(例えば黒鉛)を対にして用いる方法である。また、中性子エネルギースペクトルの測定方法の一つとして、反跳陽子を検出する方法(リコイルプロトコクター)がある。これらの方法では、主に中性子と水素原子の反跳反応を利用しており、反跳された水素核は正の電荷を持つすなわち陽子線として、解析評価されるのが普通である。

陽子線と水蒸気や水素ガスとの反応の研究は古くから行われてきている¹⁾。水蒸気については、陽子線のエネルギーが100keV以上では大部分の反応が電離であるが、100keV以下になると、電離、励起、電荷交換、弾性散乱の反応が競合するようになることが、Miller et al. (1973)によって報告されている²⁾。また、近年、計算機の発達により、各種のモデルを用いた計算による実験データの評価が精力的に行われてきている。Fainstein et al.(1993)の報告では、水素ガスに入射した陽子線は、陽子線として存在す

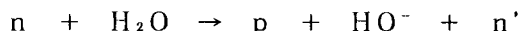
るものと、電子を捕獲して中性水素粒子として存在するものがあり、入射陽子線のエネルギーが数十 keV より低いエネルギー領域では、中性水素粒子の割合が増えてくることである³³⁾。

一方、中性子と生体や水素ガスなど水素を多く含む物質の初期反応過程では、中性子によって反跳され飛び出す水素原子核についての考察が重要である。飛び出す時点で、①外殻電子を持たない場合（陽子線）と、②外殻電子を伴っている場合（中性水素粒子）と、③一つ余分の外殻電子を持った場合（マイナス水素粒子）の反応が競合して起きることが予想できる。これらの反応の起こり易さは主に中性子のエネルギーに依存しており、100keV 以上の高速中性子では大部分①になり、熱外中性子等の低エネルギー中性子に対しては①と②と③が競合するようになると考えられる³⁴⁾。以上のことから本報告では、熱外中性子と水素の反跳反応により生じる中性水素粒子(反跳非電離反応と呼ぶ)が、反跳陽子検出器や対電離箱を用いた測定結果にどのような影響を与えるか、またその生体に対する照射効果にどのように影響するか等について、概念的な検討を加えてみた。

2 中性子と生体との初期反応過程及び反跳非電離反応の影響

生体と中性子との相互作用で重要な水分子との反応に着目する。この中でも重要な中性子と水素原子との反応の初期過程だけを考えてみると、

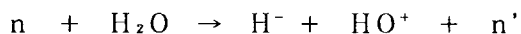
(1) プラスの水素原子（陽子線）とマイナスの水酸基が生じる場合、



(2) 中性水素原子（中性水素粒子）と中性の水酸基が生じる場合、



(3) マイナス水素原子（マイナス水素粒子）とプラスの水酸基が生じる場合



の3つが競合して起こっていることになる。中性子のエネルギーによって(1)と(2)と(3)の割合が変化していることが予想される。なお、(3)の反応は(1)と(2)の反応に比べて十分小さい。生体内で中性子との反跳反応で生じた陽子線は、生体を構成している原子や分子の励起や電離、また熱という形で最終的にはほとんどの運動エネルギーを生体に与える。同様に反跳時に中性水素粒子やマイナス水素粒子であっても、生体構成元素と作用して最後は陽子線の場合と同様に、その運動エネルギーは、生体を構成している原子や分子に与えられる。

ここで、陽子線に対する水蒸気の阻止能のエネルギー依存性の一例を図1に示す。電離、励起、電荷交換、弾性散乱の反応が競合することを示しており、数十 keV 以下では電

離と電荷交換反応が重要になってくる事が分かる。これらのことから熱外中性子と生体の反応を検討する場合の代表的な反応は、以下の三つになると考えられる。ここで、pは陽子線、eは電子線、Hは中性水素粒子を表している。

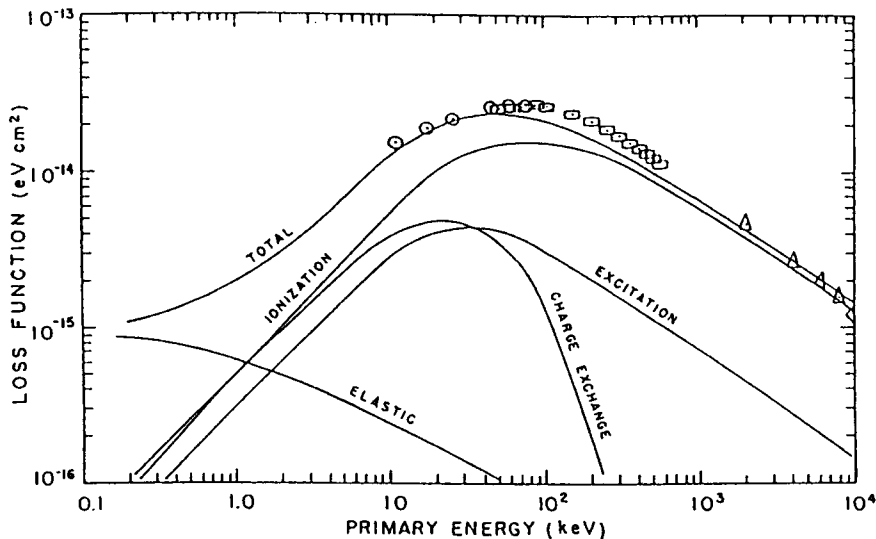
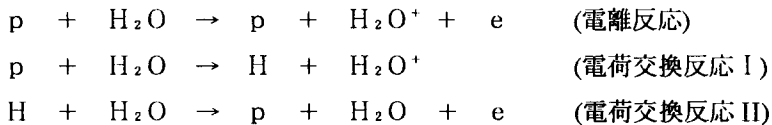


図1 陽子線に対する水蒸気の阻止能
(J.H.Miller, Rad. Res. 54 (1973) 354p)

熱外中性子の生物学的な効果比 (RBE) を検討する場合について述べる。生体中で起こる励起反応、電離反応、電荷交換反応はそれぞれの生体への影響が異なることが予想される。このことから、生体内で熱外中性子により発生する陽子線や中性水素粒子等に関する、励起、電離、電荷交換反応の中性子エネルギー依存性を詳しく検討する必要があることが分かる。各粒子がエネルギーを失うまでのそれぞれの反応回数、吸収エネルギーに占める割合、また、直接及び間接的に引き起こされる化学反応等が重要な検討事項となる。

3 電離箱に対する中性子の反跳非電離反応の影響

反跳陽子検出器も組織等価電離箱も、中性子を検出する場合のその主な反応は中性子と水素との反応である。いずれも電荷量を測定する電離箱であることから、原理的には中性子の反跳非電離反応を検出することができないことになる。従って、単純に考えれ

ば、反跳陽子検出器や組織等価電離箱は、反跳非電離反応に与えられた I_{rel}^{+} -分だけ少ない信号を測定していることになる。実際には、反跳非電離反応で発生する中性水素粒子が、電離箱の電離ガスや壁材と反応して陽子線や電子を発生することから、ある程度の検出はされていると考えられる。しかし、どの程度の割合で測定されるかなどが問題となる。これは空洞電離箱の測定原理が成立するかどうかの問題とも捉えられる。このことを検討するには以下のような状況を踏まえて、電離箱を通過する荷電粒子束が電離箱の存在に影響されていないことを評価する必要がある。

- 1) 反跳反応のうち、非電離反応と電離反応の割合の中性子 I_{rel}^{+} -依存性
- 2) 電離ガス内で発生する中性水素粒子と電離ガス及び電離箱壁との反応
- 3) 電離箱壁で発生する中性水素粒子と電離ガス及び電離箱壁との反応

参考として、陽子線が水素ガスに入射した後、陽子線として存在する割合と、電子を捕獲して中性水素粒子として存在する割合の入射陽子線の I_{rel}^{+} -依存性を図2に示す。図2は数十 keV のところを境に、中性水素粒子となる反応の影響が顕著になってくることを示唆している。

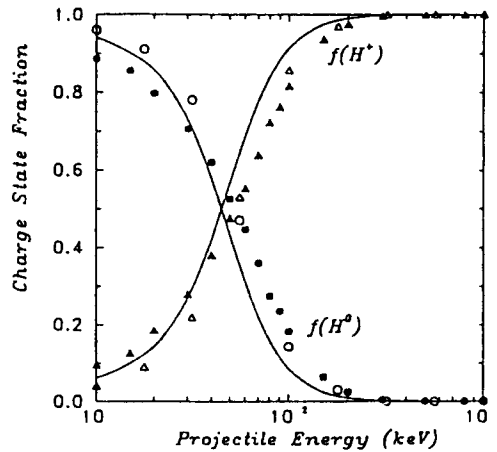


図2 陽子線が水素ガスに入射した時の中性水素原子と陽子線の割合
(P.D.Fainstein, Physical Review A, Vol. 47 (1993) 3059p)

4 まとめ

近年、数十 keV 近辺の中性子のRBEが問題にされている。放射線の生物への照射効果は、LET効果に代表されるように、吸収エネルギー密度の空間的な分布に大きく影響される。今回取り上げた中性子の反跳によって生じる中性水素粒子については、生

体中の飛程やLETも陽子線とは異なる特性を持つことが予想される。また、組織等価電離箱を用いた吸収線量測定においても中性水素原子の応答関数への影響も考慮する必要がある。これらのことから、熱外中性子のRBEを検討する場合、(1)反跳非電離反応等が組織等価電離箱を用いた中性子吸収線量測定に与える影響と、(2)生体内で発生する中性水素粒子等の生物学的効果に与える影響の両面から検討する必要があると思われる。

我々は、熱外中性子を中性子捕捉療法へ応用する場合の線量測定法及びその評価方法の確立を目指している。この観点から、組織等価電離箱等を用いた中性子吸収線量測定法を再検討するなど、これらに関連したデータ及び評価方法の整備を進めていく必要があると考えている。

参考文献

- <1> S.K.Allison, "Experimental Results on Charged-Changing Collisions of Hydrogen and Helium Atoms and Ions at Kinetic Energies above 0.2 keV", *Reviews of Modern Physics* 30 (1958) 1137-1168.
- <2> J.H.Miller and A.E.S. Green, "Proton Energy Degradation in Water Vapor", *Radiation Research* 54 (1973) 343-363.
- <3> P.D.Fainstein, V.H.Ponce, A.E.Martinez, "Distorted-wave calculation of stopping powers for light ions traversing H Targets", *Physical Review A*, Vol. 47, No 4 (1993) 3055-3061.
- <4> Gustavo Olivera, private communication, (1994.8)