

(6) BNCT のための 3 次元ゲル線量計の放射化影響の検討

広島国際大学保健医療学部	林慎一郎
京都大学原子炉実験所	櫻井良憲
京都大学大学院工学研究科	内田良平
近畿大学原子力研究所	若林源一郎

1. 背景・目的

京都大学原子炉実験所では中性子を利用した放射線治療法の一つである、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT: Boron Neutron Capture Therapy)の臨床研究が行われている。ホウ素の安定同位体である B-10 は中性子吸収断面積が大きく、熱中性子との B-10(n, α)Li-7 反応によりアルファ粒子とリチウム原子核を生成する。これらの重荷電粒子の生体組織中での飛程は 10 μ m 以下であり、細胞 1 つと同程度であるため、腫瘍細胞の選択的な破壊が期待できる。深部腫瘍に対する BNCT では、主に keV 領域のエネルギーをもつ熱外中性子を用いる。照射された熱外中性子は、ターゲットによる弾性散乱によって減速され、腫瘍深さで熱領域のエネルギーとなる。このように BNCT においては中性子の散乱反応を利用するため、中性子束分布ならびに線量分布はターゲットの形状および寸法に依存する。そのため、3次元ゲル線量計による生体等価な形状および寸法における線量分布の検証が期待されている。

BNCT 照射場において、中性子スペクトルは位置によって変化し、ターゲット核種との相互作用により様々な粒子が生成される。ゲル線量計の粒子線治療への応用に関する研究において、ポリマーゲル線量計には線質依存性があることが報告されており[1]、線量計の応答分布から線量分布を直接評価することができない。本研究では京都大学原子炉実験所における 1MW 照射に先立って、近畿大学原子力研究所の UTR-KINKI を用いて、ポリマーゲル線量計を BNCT における吸収線量測定に応用するため、中性子照射場における線質依存性を評価した。

2. 方法

本研究では、ポリマーゲル線量計として感度の高い MAGAT、中性子線量を増大するためにリチウムの添加を検討した。リチウムの安定同位体である Li-6 は、Li-6(n, α)H-3 反応によって中性子線量を増大することができ、また、B-10 と比較して 2 次ガンマ線の放出が無いという特徴がある。標準的な MAGAT (水 87wt%, メタクリル酸 5wt%, ゼラチン 8wt% および 2 mM THPC) に 25 mM および 50 mM の硫酸リチウムを添加した線量計を作成し、石英試験管 (7 mL) に封入した。加えて、無機塩の添加によるポリマーゲル線量計の感度上昇[2]と中性子線量の増大の効果を弁別するため、濃縮リチウム (96% Li-6) を含む硫酸リチウムを同量添加した線量計を作成し比較した。硫酸リチウム添加による感度変化の評価のため、京都大学原子炉実験所コバルト 60 ガンマ線照射装置を用いてガンマ線に対する線量応答を測定した。中性子の照射は、近畿大学原子力研究所の教育用原子炉 (UTR-KINKI) 中央ストリンガーにて行った。線量計をアルミ製フレームに固定し、出力 1 W 運転時に 2 および 4 時間の照射を行った。MRI 測定には広島国際大学の 0.3 T MRI スキャナ (AIRIS II) を用い、20, 50, 90 および 140 ms の 4 エコー時間における測定から横緩和率を評価した。線量計算には MCNP6.1 ならびに PHITS2.88 を用いた。MCNP を用いて臨界状態において線量計に入射する中性子および光子線束を計算し、その中性子および光子を線源として生成される荷電粒子のエネルギー付与を PHITS によって計算した。

3. 結果・考察

コバルト60ガンマ線を用いた線量応答測定において、今回用いた硫酸リチウム濃度では有意な感度上昇は認められなかった。したがって、リチウム添加による応答の変化は、主にLi-6の(n, α)反応によるものであると考えることができる。中性子照射実験により得られた、標準組成(Standard), 25および50 mM天然硫酸リチウム添加(Nat25mM, 50mM)ならびに25および50 mM濃縮硫酸リチウム添加(En25mM, 50mM)MAGAT線量計の線量応答をFig. 1に示す。図より線量計中に存在するLi-6が多くなるにつれて、単位線量あたりの応答が小さくなることが確認できる。標準組成のMAGATでは、主に反跳陽子とN-14の(n,p)反応から成る陽子線量成分がおよそ40%であるのに対し、50 mMの濃縮硫酸リチウムを加えた場合、アルファ粒子および三重陽子の寄与により重荷電粒子による線量割合が85%まで大きくなる。線量成分割合の変化を定量的に評価するため、線量計中における平均LETを計算した。感度の変化についてはコバルト60ガンマ線に対する応答を基準とし、同じ吸収線量に対する応答の比(相対効率)を線量応答の傾きから評価した。平均LETに対して各線量計の相対効率をプロットしたものがFig. 2である。このように定量的な線質依存性評価により、中性子照射場に対してもポリマーゲル線量計の応用が期待できる。

(これらの結果は下記業績一覧の学会にて口頭発表された)。

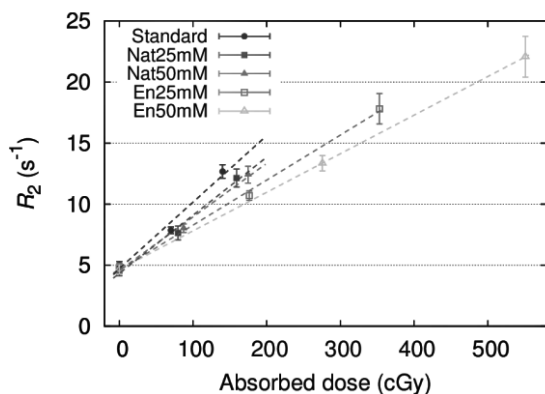


Fig. 1. Dose-response characteristic for standard and Li-added MAGAT

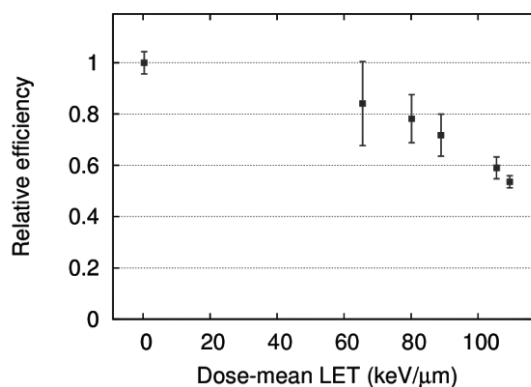


Fig. 2. LET dependence of relative efficiency for MAGAT-type polymer

参考文献

- [1] T. Maeyama et al., Radiological characteristics of MRI-based VIP polymer gel under carbon beam irradiation, *Radiation Physics and Chemistry*, **107**, 7-11 (2015)
- [2] S. Hayashi et al., Effect of inorganic salt on the dose sensitivity of polymer gel dosimeter, *Radiation Physics and Chemistry*, **81**, 884-888 (2012)

業績一覧（口頭発表）

- 1) 内田良平, 林慎一郎, 左近敦士, 若林源一郎, 田中憲一, 櫻井良憲, “Li 添加ポリマーゲル線量計の中性子照射場における応答特性”, 第 6 回 3 次元ゲル線量計研究会, 2017 年 11 月 11 日～2017 年 11 月 12 日, (栃木県・下野市)

- 2) R. Uchida, S. Hayashi, A. Sakon, G. Wakabayashi, K. Tanaka and Y. Sakurai, ”Investigation of applicability of polymer gel dosimeters with Li compounds to dosimetry in boron neutron capture therapy”, The 9th Young Researchers' BNCT Meeting, 2017 年 11 月 13 日～2017 年 11 月 15 日, (京都府・宇治市)

- 3) 内田良平, 林慎一郎, 櫻井良憲, 田中憲一, 若林源一郎, “リチウムを添加したポリマーゲル線量計による中性子線量分布測定に向けた基礎的検討”, 第 14 回日本中性子捕捉療法学会学術大会, 2017 年 9 月 29 日～2017 年 9 月 30 日, (福島県・郡山市)

実験・測定補助者

内田良平 京都大学大学院工学研究科 博士課程 3 年(D3)
(計 1 名)