

卒業論文概要書

2020年2月提出

所属学科	物理学科	氏名	細淵 真那	学籍番号	1Y16A048-5
研究題目	PBCT 実用化に向けた α 線生成核反応の実験的検証			指導員	片岡 淳

【研究背景】

粒子線治療は光子線治療と比較して優れた線量集中性を持ち、治療効果向上を実現する新たな放射線治療法として近年注目を集めている。本研究では陽子線治療の治療効率向上のため PBCT (陽子ホウ素捕捉療法) に注目した。PBCT は 2014 年に Do-Kun Yoon *et al.* によって提案され、 $p+^{11}\text{B}\rightarrow 3\alpha$ 反応に基づく。予めホウ素をがん細胞に集積させ、この領域に陽子線を照射することで反応を引き起こす。そして発生した高 LET α 粒子によってがん細胞に損傷を与える。 α 粒子の飛程は典型的な細胞の大きさと同等 ($\sim 30\mu\text{m}$) であり、正常細胞への損傷を小さく抑えることができる。実際に、PBCT の生物学的有効性は細胞実験によって検証されており、陽子線照射時のホウ素集積細胞致死率が非集積細胞と比べて増加していることが確認されている。しかし、この増加の原因が 3α 反応によるものであるという証明には至っていない。また、 3α 反応以外の α 線生成反応は未知である。そこで本研究では細胞実験によるがん細胞致死率増加の原因の特定と 3α 反応以外の陽子-ホウ素間の α 線生成反応の検証のため 2 つの実験を行った。

【水のルミネセンスイメージングによる線量測定実験】

まず、ホウ素存在下での α 粒子生成による線量増加を検証するために水のルミネセンスイメージングによる線量測定実験を行った。ルミネセンスとはチェレンコフ光の閾値以下で起こる発光現象のことで、この光が陽子線の線量分布と等しい分布を示すことが分かっている。実験では陽子線をアクリル容器内のホウ酸水溶液に照射し、異なるホウ素濃度 ($0, 1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{g/cm}^3$) における水の発光画像を CCD カメラによって撮影し、ホウ素水溶液中の α 線生成を検証した。

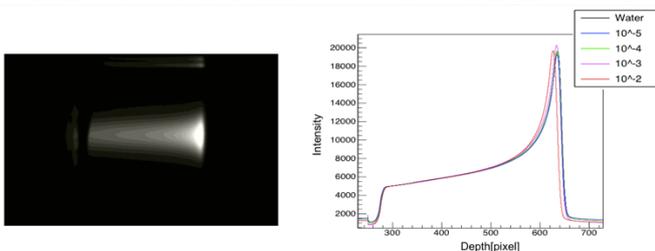


図 1 発光画像と光の強度分布

結果を図 1 に示す。各濃度において線量分布に違いが見られないことが分かる。これは α 粒子による線量付与は局所的であり、陽子線による寄与が支配的であるためであると考えられる。これに対して、細胞実験による生物学的効果の向上が確認されており、このこ

から PBCT では身体への線量を増加することなくがん細胞の殺傷率の向上が可能であることが言える。

【ホウ素含有シンチレータを用いた α 粒子の検出】

次に、ホウ素含有プラスチックシンチレータを用いてシンチレータ内に含まれるホウ素と陽子の反応によって発生する α 線の直接検出を行った。実験ではホウ素を含むシンチレータと含まれないシンチレータを重ねて配置し、陽子線を照射した。 α 線生成核反応が捕捉反応であることから前後段の非同時計数を行うことで α 線の検出を行った。結果を図 2 に示す。

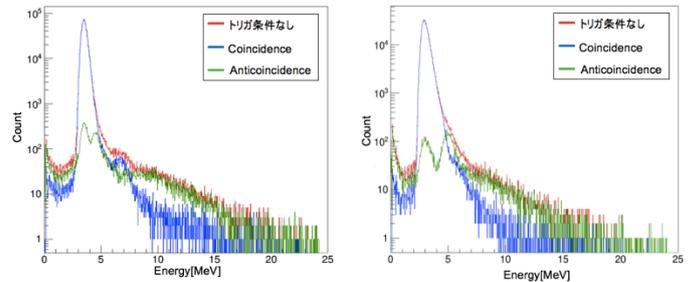


図 2 各トリガ条件におけるスペクトル
(左) ホウ素非含有、(右) ホウ素含有

非同時計数スペクトルでは 2 つのピークが確認でき、ピークは左から、ADC の不感時間、弾性散乱に由来するものである。弾性散乱に由来するピークが非含有シンチレータと比べてホウ素含有シンチレータで増加していることが確認でき、この増加が α 線生成によるものであると考えられる。2 つのスペクトルから α 線のカウントを求め、 α 粒子の生成数から α 線生成の反応断面積を求めた。得られた反応断面積は理論予想よりも大きく、このような α 線生成によって細胞実験によるがん細胞致死率増加の説明が可能となると考えられる。

【まとめと今後の展望】

本研究では α 線生成反応の検証を行うため、2 つの実験を行った。線量測定実験ではホウ素の有無によって線量分布に差異が見られず、PBCT は陽子線治療と同程度の線量でがん細胞致死率増強をもたらすことが確認された。 α 線の直接検出実験では、 3α 反応以外の反応を含む α 線生成の総反応断面積を求めた。得られた α 線生成数は理論計算によって得られた値より大きく、細胞実験結果の説明につながると考えられる。今後の実験では、BP 付近での α 粒子生成の検証や α 粒子とその他の荷電粒子との識別を明確にしていきたい。