

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：23903

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07116

研究課題名(和文)原子核乾板技術を用いた陽子線治療にともなう中性子二次被ばくの測定

研究課題名(英文)Secondary neutron measurements in proton therapy with nuclear emulsion technology.

研究代表者

木村 充宏(Kimura, Mitsuhiro)

名古屋市立大学・大学院医学研究科・研究員

研究者番号：90782334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：陽子線がん治療で生じる二次中性子のエネルギーと空間分布を調査することを目標として、サブミクロンの位置分解能をもつ原子核乾板の二次中性子検出能力について調べた。GEANT4シミュレーションにより検出器構造の最適化を行ったのち、治療用陽子線を水ファントムに照射するテスト実験を行った。数回にわたる照射実験の結果、乾板中に記録された反跳陽子飛跡の観察に成功した。また乾板間の飛跡の接続を行い、1000万本の飛跡の再構成を行った。

研究成果の概要(英文)：We have evaluated detection capability of nuclear emulsion with submicron spatial resolution in order to investigate energy and spatial distributions for secondary neutrons induced by proton therapy. The Geant4 simulation was performed to optimize a detector construction, and test experiments were conducted to irradiate a water phantom with a therapeutic proton beam. Several experiments allowed us to detect clear recoil proton tracks in an emulsion film and reconstruct ten million tracks in the detector.

研究分野：医学物理

キーワード：放射線医学

1. 研究開始当初の背景

(1) プラッグピークの特性を活かした陽子線がん治療技術は、正常臓器に余計な線量を与えず、腫瘍に対し局所的に大線量を照射できるという特徴をもつ。少ない有害事象と優れた臨床成績を両立した陽子線がん治療は2016年4月より小児がん治療(限局性固形がんの場合)が保険適用になった。

陽子線による腫瘍への線量投与は現在の治療計画装置で精度よく計算することができる。一方、陽子線と体内原子核の核反応で生じる二次中性子による線量付与は、治療計画で全く考慮されない。二次中性子の影響はがん治療後に二次がんとして現れ、患者の長期的な生活の質を悪化させる。特に治療後に長期的生存が見込める小児がん患者の生活の質に大きな影響を与えるため、その影響を評価することは喫緊の課題である。

(2) 電気的に中性である中性子は様々なものにより散乱され、エネルギー的にも空間的に広く分布する。検出器は散乱後の中性子がもつ幅広いエネルギーを捉える能力と散乱先の広い空間をカバーする能力を併せ持つ必要がある。

これまで、中性子測定のために金属層を持つボナーボールが用いられてきた。この検出器は幅広いエネルギー領域に感度を持つが、20 MeV 以上の高エネルギー中性子の基準場がないためアンフォールディング法によるエネルギー推定の精度が悪い。また空間的に点の測定であるため、連続的な分布を知るためにモンテカルロシミュレーションが必要であるという欠点があった。

一方、荷電粒子に感度を持つ写真フィルム的一种、原子核乾板はこれらの欠点を克服することができる。原子核乾板はサブミクロンの位置分解能をもつ放射線検出器で、中性子の反跳陽子が通った飛跡を銀粒子の列として三次元的に記録できるため、飛程と反跳角度から中性子のエネルギーを直接求めることができる。また近年、原子核乾板中に記録された飛跡を超高速で読み出す装置(超高速飛跡読取装置, HTS)が開発され、1 m²スケールの空間を連続的にサンプリングすることが可能になった。

2. 研究の目的

陽子線がん治療によって生じる二次中性子を正確に評価するために、サブミクロンの空間分解能をもつ原子核乾板検出器の二次中性子に対する検出性能を評価することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 検出器構造の最適化

陽子線がん治療の照射ビームで生じる二次中性子の反応事象をモンテカルロシミュ

レーションによって見積もり、事象をサンプリングするための原子核乾板検出器の構造を最適化した。

シミュレーションは GEANT4(Ver.10.0) を用いて行った。人体を模した 20 cm 幅の水ファントムにエネルギー165 MeV の単色陽子線をスポットスキニング法で照射する。水ファントム後方に原子核乾板検出器を設置した。検出器の大きさは 5 cm x 6.25 cm x 12.5 cm、原子核乾板と中性子標的となるポリエチレン1 mm厚を交互に積層した Emulsion Cloud Chamber (ECC) の構造とした。二次中性子がポリエチレン中の水素標的と衝突して生成した反跳陽子の飛跡を原子核乾板で捉える。水ファントムに陽子を 5×10^6 照射し、二次中性子と反跳陽子の事象数、エネルギーと角度分布を求めた。これらの情報から検出器が二次中性子を捉えるために必要な大きさを求めた。

(2) 陽子線照射実験

治療用陽子線によって生じる二次中性子を原子核乾板検出器で捉え、原子核乾板検出器の中性子検出能力の評価した。

検出器の大きさは 5 cm x 6.25 cm x 12.5 cm とした。検出器構造はシミュレーションと同様、原子核乾板とポリエチレン 1 mm 厚を交互に積層したものである。原子核乾板は厚さ 180 μm のポリスチレンシートに厚さ 70 μm の原子核乳剤を両面塗布した構造である。原子核乳剤は臭化銀とゼラチンの体積比が 3:7 のものを用いた。この乳剤は長基線ニュートリノ振動実験 OPERA で用いられたものと基本的に同じものであるが、潜像退行(高温高湿下で飛跡が消去される現象)を引き起こす薬剤は添加していない。使用した原子核乳剤は名古屋大学物理F研究室の乳剤製造装置を用いて製造し、同研究室の暗室で塗布、裁断、検出器構築を行った。

照射実験のセットアップを図1に示す。名古屋陽子線治療センターのスポットスキニング照射装置 G1 を用いて、単色 165.4 MeV の治療用陽子線を 1 Gy、水ファントムに照射した。水ファントム後方に原子核乾板検出器を設置し、水ファントム中で生成した二次中性子を捉える。陽子線照射後の原子核乾板は名大F研の現像室にて現像を行った。現像は OPERA 実験で用いられる現像液 XAA を用いて 20 °C 25 分の条件で行った。現像後の乾板は同研究室の超高速飛跡読取装置 HTS を用いて飛跡情報を取得した。乾板ごとの飛跡情報はオフラインでアライメント処理を行い、三次元的に飛跡を再構成した。

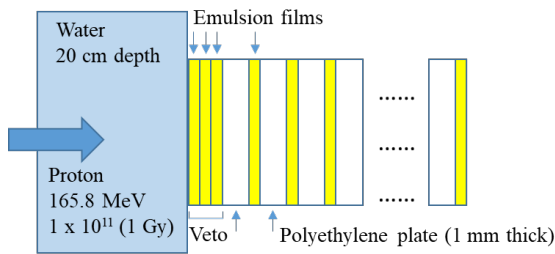


図 1. 陽子線照射のセットアップ

4. 研究成果

(1) 検出器構造の最適化

シミュレーションの結果、検出器中で反跳陽子を生成する二次中性子の平均エネルギーは 32 MeV (ピークは 8 MeV)、平均生成陽子数は 1.05、陽子の飛跡を生成する確率は 5×10^{-4} であることが分かった。これから 165 MeV 陽子を 1 Gy 照射した場合、検出器中で生成される反跳陽子の飛跡数は 6×10^6 と推定される。

生成した反跳陽子の平均エネルギー 16 MeV (水中飛程 3 mm 相当)、平均放出角度はビーム入射方向を基準として $\langle \cos\theta \rangle = 0.70$ (1.0 radian) であった。図 2 に反跳陽子のエネルギーと貫通乾板数の関係を示す。反跳陽子を検出器中で止めるには乳剤層 140 層、両面塗布の乾板 70 枚が必要になることが分かった。一方、反跳陽子の生成点分布から、本検出器構造下での二次中性子平均反応長が 50 mm であることが分かった。検出器中で二次中性子の大部分 (95%) を反応させるには平均反応長の 3 倍が必要なので、検出器は 150 mm の深さが必要である。

これらを総合して、治療用陽子線から発生する高エネルギー二次中性子の反応事象を捉えるには 50 cm x 50 cm x 25 cm の原子核乾板検出器が必要になることが分かった。この大きさは現在行われている他分野 (ニュートリノ振動、宇宙線観測) 実験と同程度かそれ以下であり、検出器作製に問題が発生するスケールではない。

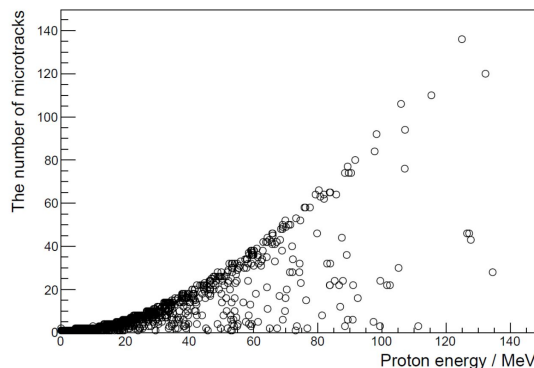


図 2. シミュレーションによって得られた反跳陽子のエネルギーと貫通乳剤層の関係

(2) 陽子線照射実験

これまでに照射実験は 2016 年 12 月と 2017 年 9 月の 2 回行った。

(a) 2016 年 12 月照射実験の結果

2016 年 12 月に一回目の照射実験を行った。現像した乾板を HTS でスキャンし、オフライン上で乾板間のアライメントをとり、隣同士の乾板で飛跡を接続した。

接続した飛跡の平均黒化濃度を求めた結果を図 3 に示す。一部の乾板で平均黒化濃度が減少していることが分かる。これは定着処理が不十分なため現像後の乾板が着色し、読み出し後の飛跡情報の品質が悪かったことが原因である。

またフィルム 20 番以前で濃度にばらつきがみられた。これらの乾板はアライメントが失敗し、飛跡同士が接続できなかった。検出器構築時にアライメント処理で吸収できないほど乾板相互の位置関係にねじれが発生したのが原因であると考えられる。

これらの解決策として、定着処理時間の延長、検出器構築時の乾板位置関係を固定する治具を導入した。

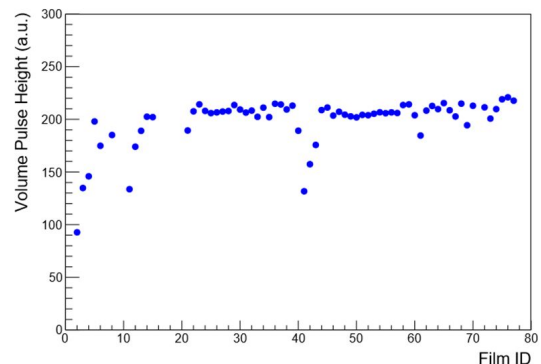


図 3. フィルム番号とその乾板中に記録された飛跡の平均黒化濃度の関係

(2) 2017 年 8 月照射実験の結果

2017 年 8 月に二回目の実験を行った。実験セットアップは前回と同様であるが、乾板相互の位置関係を固定する治具の導入、定着処理時間を前回の 4 倍にして現像のクオリティを維持する対策を行った。その結果、現像後、反跳陽子と思われる飛跡を顕微鏡下で検出した。また乾板を HTS で測定し、オフライン上で全乾板のアライメント処理を行い、記録された飛跡の平均黒化濃度は全乾板にわたってほぼ一定であることを確認した。

アライメント処理後、乾板間で飛跡を接続した。接続後の総飛跡数は 1.5×10^7 本であり、この中には宇宙線の飛跡やフェイク (接続間違い) の飛跡も含まれている。現在、反跳陽子の飛跡のみを抽出する条件を求めている。

また乾板間の飛跡の接続効率を求めた。接続効率は通常 98%以上であるが、本実験の接続効率は 86.4%（全乾板の平均値）と通常よりも低い値であることが分かった。

接続効率が 90%以上の乾板と 80%以下の乾板について、接続した飛跡の位置分布を図 4 に示す。接続効率 80%以下の乾板で位置により飛跡数にムラがあることが分かる。この原因は現在でも完全に特定できていないが、塗布時に発生したトラブルにより塗布のクオリティが低いフィルムを使用したことが原因と推測している。我々は名大の塗布室を他実験グループと共有しているが、我々の前に作業を行ったグループが使用したフィルム用裁断機から鉄粉が発生し、我々のフィルムに付着して乾板を黒化させてしまった。多くの乾板を廃棄せざるをえず、使用できる乾板の枚数が減り、乳剤層厚のムラが大きいフィルムを使用せざるを得なくなった。なお本現象発生後、再発防止のために塗布室の共同利用に対するルールが策定された。

今後は乳剤層の再膨潤を行って膜厚を整えた後、HTS を用いて飛跡情報の再取得を行う予定である。

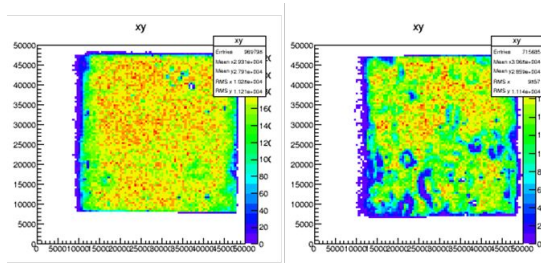


図 4. 乾板間で接続した飛跡の位置分布。(左)接続効率が 90%以上の乾板と(右)80%以下の乾板。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

木村 充宏、「原子核乾板技術が切り拓く陽子線がん治療の未来」、原子核乾板研究会(日本写真学会分会)名古屋大学(名古屋)、2017年2月

木村 充宏、「原子核乾板技術を用いた陽子線がん治療の高精度化に向けた研究」、第31回固体飛跡検出器研究会、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所(奈良)、2017年3月

木村 充宏「原子核乾板技術を用いた陽子線がん治療中に生じる即発ガンマ線、二次中性子の測定」、日本写真学会 2017年度年次大会、一橋大学一橋講堂(東京)、2017年6月

M. Kimura, “Fast and ultrafast

secondary neutron measurements in proton therapy”, International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (ICMaSS2017), Nagoya University (Japan), Sep. 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村充宏(KIMURA, Mitsuhiro)

名古屋市立大学・大学院医学研究科・研究員

研究者番号: 90782334

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()