

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26293137

研究課題名(和文) 粒子線治療における線量評価技術の開発

研究課題名(英文) Development of dosimetry standards for ion beam therapy

研究代表者

齋藤 則生 (Saito, Norio)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・副研究部門長

研究者番号：80344191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：炭素線の線量を評価するためにグラファイトカロリメータおよび水カロリメータを開発し、290MeV/nの炭素線の線量測定を行った。その結果、両方のカロリメータともに炭素線の線量を十分な精度で測定できることを示した。水カロリメータとグラファイトカロリメータによる線量の測定結果を比較すると、概算では両者とも概ね良い一致を示し、炭素線の線量標準の実現を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a graphite calorimeter and a water calorimeter for ion beams. We tested the performance of the calorimeters and those show the reasonable response to the carbon ion beams. The dose measurements by the calorimeters show a good agreement each other, which suggests us that the dosimetry standards for ion beam therapy will be established.

研究分野：放射線計測

キーワード：粒子線治療 水吸収線量 線量標準 グラファイトカロリメータ 水カロリメータ

1. 研究開始当初の背景

我々のグループでは、コバルト 60 の線および医療用リニアク光子線の水吸収線量標準を開発してきた。その結果、これら光子線の水吸収線量を不確かさ 1%未満で評価することに成功し、海外の標準と同等の精度で評価できるようになった。一方、炭素線などの重粒子線の水吸収線量の不確かさは 6~7%程度あり、さらなる高精度化が可能であると考えられる。

水吸収線量の絶対評価には、放射線照射による受光部の上昇温度計測を基にした熱量計(カロリーメータ)が国際的に多く用いられている。当グループでも、グラファイトカロリーメータによる光子線の水吸収線量標準を開発してきた。そこで、本研究では、当グループに技術的蓄積のあるグラファイトカロリーメータによる水吸収線量評価からスタートし、最終的には水カロリーメータによる水吸収線量の絶対評価を目指す。これらカロリーメータを使い、光子線と同等の精度での炭素線の水吸収線量の絶対評価を目指している。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究の目的は、治療用重粒子線である炭素線の水吸収線量の絶対値を、不確かさ 1~2%の高精度で決定することである。

そのために、異なる二つの手法、グラファイトカロリーメータおよび水カロリーメータを開発する。そして両者を用いて炭素線の水吸収線量を測定する技術を開発し、その比較を行うことを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず、炭素線の性質を把握し、線量計測のための基礎データを蓄積した。単色の炭素線および治療用の線質について、水中やグラファイト中の深度電離量分布や空間分布の測定を行った。治療用の線質では深度電離量分布が平坦でなく、線量測定には不向きであるため、深度電離量分布が平坦となるリッジフィルタの開発を行った。

線量評価を行うためにグラファイトカロリーメータおよび水カロリーメータの開発を行った。グラファイトカロリーメータでは測定系の S/N 比が十分ではなかったため、原因を見極め、改良を行い、測定精度を確保した。

水カロリーメータは、放射化学反応による吸収エネルギーの消費(熱欠損)を抑えるために、ガラスセル中へのガス導入システムを開発した。その結果、水カロリーメータにおいても、十分な SN 比と再現性であることを確認した。

最後に、2つのカロリーメータの相互比較を行った。

4. 研究成果

(1) 炭素線の線質評価

電離箱線量計による線質評価(深部電離量

分布)は、単色の 135MeV/n と 290MeV/n の炭素線を用いて行った。図 1 に炭素線の 290 MeV/n の深部線量分布の結果を示す。水ファントムとグラファイトファントムで、ブラッグピークの位置が異なるが、これは阻止能比の違いを反映している。阻止能比の文献値(ICRU report 73)と数%以内で一致する結果が得られた。炭素線 135 MeV/n でも同様の結果となり、これらの結果について、モンテカルロ計算で評価を行う予定である。

炭素線 290 MeV/n の照射野内の二次元強度分布を図 2 に示す。なお、照射野の大きさは直径 10 cm であり、水深さは 2 cm で測定を行った。

この結果から、グラファイトカロリーメータの受光部の大きさが直径 20 mm であるため、この不均一性の補正が必要であることが分かった。

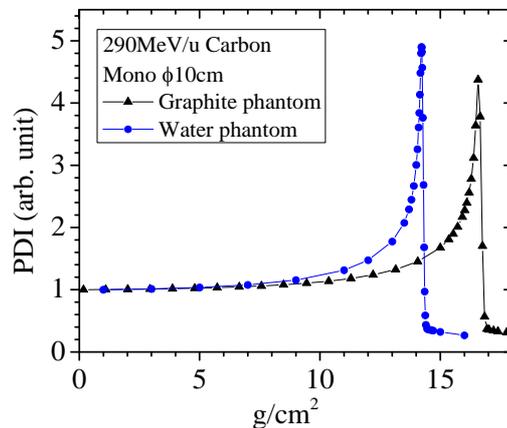


図 1: 炭素線の深部電離量分布(単色 290 MeV/n)の測定結果(青丸:水ファントム、黒三角:グラファイトファントム)

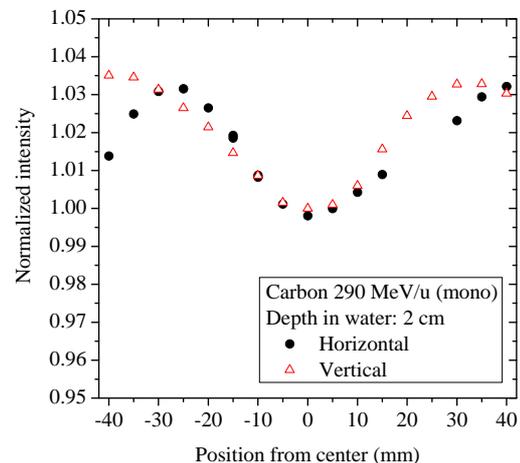


図 2: 炭素線 290 MeV/u の二次元強度分布

次に、治療の条件に近い 290MeV/n の炭素線の拡大ブラッグピーク(SOBP)が 6cm での線質評価(深部電離量分布測定)を行った(図3参照)。その結果、吸収線量を評価する水深さである SOBP 中心付近での物理線量の勾配が大きく、吸収線量の測定精度への影響が懸念された。そこで、これまで取得した基礎データを基に、SOBP 中心での物理線量を平坦化するためのリッジフィルタの設計・製作をした。(図3参照)。

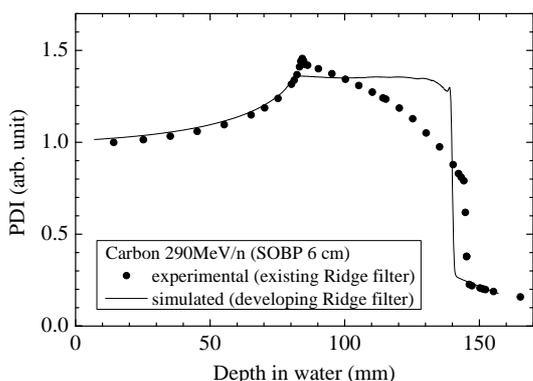


図 3: 既存のリッジフィルタによる深部電離量分布(実測値)およびリッジフィルタの深部電離量分布の設計値

290MeV/n (SOBP 6cm) の炭素線用に新たに開発したリッジフィルタを用いて、深部電離量測定を行った。図4に示す通り、開発したリッジフィルタにより、吸収線量を評価する深さ(および電離箱を校正する深さ)である SOBP 中心近傍での物理線量の平坦化を確認した。さらに、グラファイト中でも深部電離量分布の測定を行い、290MeV/n の単色炭素線の場合(図1)と同様に、阻止能比の違いを反映した結果を得た。

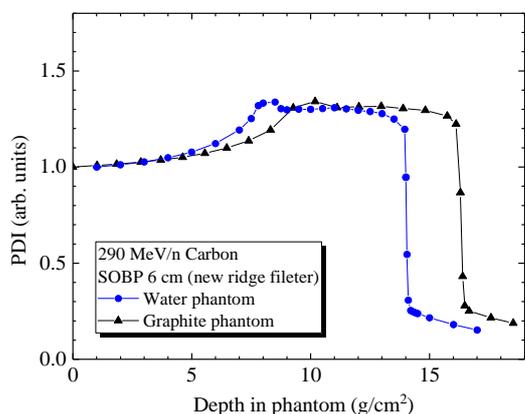


図 4: 290MeV/n 炭素線(SOBP 6cm)用に開発したリッジフィルタの深部電離量分布(PDI)の測定結果

(2)グラファイトカロリメータ

図5にグラファイトカロリメータの外観を示す。炭素線の照射によりグラファイトカロリメータの受光部の温度が上昇することにより、線量を評価する装置である。図6にグラファイトカロリメータの内部構造を示す。受光部は3重構造になっており、それぞれヒータと温度センサが取り付けられている。その周りにはグラファイトのファントム、そして、PMMA の真空容器内に収められている。熱断熱のために、内部を真空に保っている。受光部の温度測定および温度制御は交流ブリッジ回路を用いて行った。

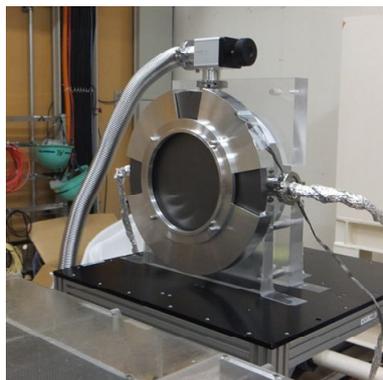


図 5: グラファイトカロリメータの外観

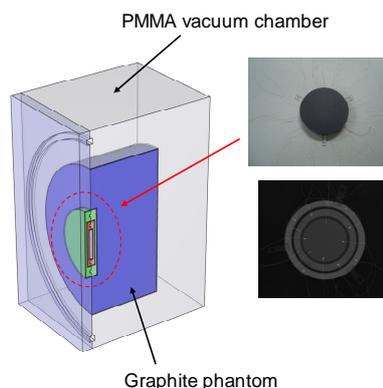


図 6: グラファイトカロリメータの内部構造

グラファイトカロリメータを用いて、単色 290MeV/n の炭素線の熱量測定を行った。結果の一例を図7に示す。黒線は検出部の温度変化を示す。時間にして、100秒、200秒、300秒あたりで温度が上昇しているのは、炭素線を照射しているためである。450秒付近で温度上昇をしているのは、外部からの電力により受光部を加熱したときの温度上昇である。外部電力による温度上昇と炭素線による温度上昇を比較することにより受光部に吸収されたエネルギー(線量に相当する)を測定することができる。また、図6では十分なSN比を達成していることを確認した。

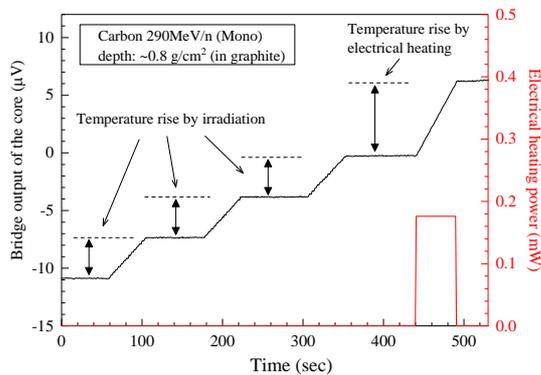


図 7：グラファイトカロリメータによる炭素線(単色 290MeV/n)の熱量(吸収線量)測定の一例(黒線：検出部の温度変化、赤線：感度校正用電気ヒータへの投入電力)

(3)水カロリメータ

図 8 に水カロリメータの受光セルの写真を示す。受光セルは石英ガラスで作成されており、中心付近にサーミスタを取り付けたガラスプローブを挿入して、受光セル中心の温度測定を行う仕組みとなっている。

受光セル内に充填する水には、放射化学反応による熱消費を抑えるため、水素または窒素などのガスを溶解させておく必要がある。そこで、本研究ではガス溶解装置を製作し、水素又は窒素ガスをバブリングさせたガス溶解槽内の超純水を受光セルとの間で長時間循環させ、ガスを溶解させた水で受光セルを充填できるようにした。

受光セルを取り付けた水ファントムは対流による熱拡散を抑える為、全体を恒温槽に格納し、4 に保った状態で放射線の線量計測を行った。

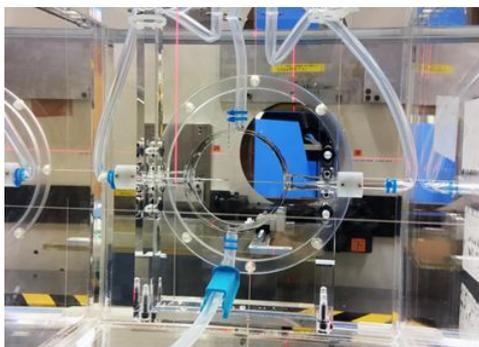


図 8：水カロリメータの受光セル。中央の石英ガラス製の受光セルに飽和水素水が充填されている。

図 9 に水カロリメータに 290 MeV/n の炭素線を照射した際の測定結果を示す。図から分かる様に、ビーム照射によってモニタ線量計の出力が増えると同時に、それにあわせて受

光セル中心付近の水温が上昇していることが分かる。今回の測定では、250 秒間の照射を 10 回繰り返すことで、変動係数 0.25 %、統計不確かさ 0.1 %程度で安定した測定値を得ることができ、炭素線の水吸収線量を安定して測定する技術を確立できた。

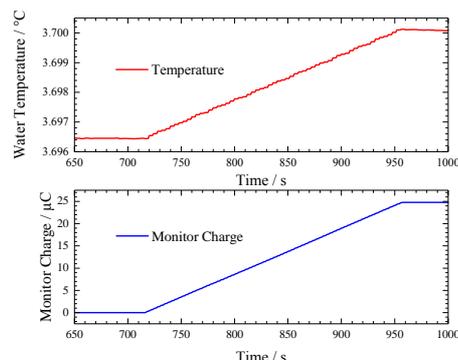


図 9：水カロリメータの測定結果。上が受光セル中心付近の水の温度上昇を示し、下はビームモニタ線量計の出力を示す。

(4)グラファイトカロリメータと水カロリメータとの比較

290MeV/n の炭素線の吸収線量について、グラファイトカロリメータと水カロリメータのとの比較実験を行った。その結果は現在解析中であるが、両者とも概ね良い一致を示したと考えている。

以上の結果により、炭素線の水吸収線量標準の開発が実現することを示すことができた。

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 5 件)

齋藤則生、黒澤忠弘、加藤昌弘、森下雄一郎、田中隆宏、清水森人、Dosimetry standards at NMIJ/AIST、APMP TCRI、2014.9.24、KRIS、韓国

齋藤則生、Development of dose standards for radiotherapy at NMIJ、Medical Metrology Workshop、2014.9.24、KRIS、韓国

田中隆宏、清水森人、森下雄一郎、黒澤忠弘、加藤昌弘、齋藤則生、治療用荷電粒子線の水吸収線量標準の開発状況、2015 年度 NMIJ 成果発表会、2015.1.23、産総研共用講堂、茨城県

齋藤則生、量子線、放射線に関する計測標準技術、分析計測標準研究部門第 1 回

シンポジウム、2015.9.4、幕張メッセ、千葉県

齋藤則生、Laboratory report of dosimetry group of NMIJ、APMP TCRI、2015.11.2、NIM、中国

清水森人、田中隆宏、森下雄一郎、加藤昌弘、黒澤忠弘、齋藤則生、水カロリメータの開発、第112回日本医学物理学会学術会議、2016.9.9、沖縄コンベンションセンター、沖縄

田中隆宏、清水森人、森下雄一郎、加藤昌弘、黒澤忠弘、齋藤則生、治療用炭素線の水吸収線量の絶対評価に向けた取り組み、第112回日本医学物理学会学術会議、2016.9.9、沖縄コンベンションセンター、沖縄

齋藤則生、黒澤忠弘、加藤昌弘、森下雄一郎、田中隆宏、清水森人、山口英俊、Dosimetry standards at NMIJ、APMP TCRI、2016.11.14、ダナン、ベトナム

〔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

産業技術総合研究所公式ホームページ

<https://www.aist.go.jp>

計量標準総合センターホームページ

<https://www.nmij.jp>

放射線標準研究グループホームページ

<https://unit.aist.go.jp/rima/ioniz-rad/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤則生 (Saito Norio)

産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・副研究部門長

研究者番号：80344191

(2) 研究分担者

清水森人 (Shimizu Morihito)

産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：20613988

(3) 研究分担者

田中隆宏 (Tanaka Takahiro)

産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：30509667