

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：81603

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K16775

研究課題名（和文）歯科金属が陽子線治療の線量分布に与える影響の解明

研究課題名（英文）Effects of dental metals on dose distribution in proton beam therapy

研究代表者

加藤 亮平（Kato, Ryohei）

一般財団法人脳神経疾患研究所・南東北がん陽子線治療センター・研究員

研究者番号：90867566

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000 円

研究成果の概要（和文）：陽子線治療において、患者体内に存在する金属は線量分布を擾乱させることが広く知られている。しかし、これらの金属は陽子線によって放射化する可能性があるが、その影響について未だ解明されていない。そのため、本研究では歯科金属を含む金属の放射化の影響を調査した。その結果、モンテカルロシミュレーションが放射性核種の同定に対して有効であることが示された。また、放射化に起因する金属近傍の線量増加は処方線量に対してわずかであることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子線治療において、体内金属の放射化の影響はほとんど明らかにされていない。本研究では、放射化した金属周囲の線量増加は処方線量に対してわずかであり、金属から距離を取ることで線量は大幅に低減することも明らかとなった。そのため本研究で得られた知見は、陽子線治療における歯科金属を含む体内金属の取扱いに関する指針の一助となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In proton beam therapy (PBT), metals in the patient body perturb the dose distribution, and their radioactivation may affect the dose distribution around the metal. However, the radioactivation effect has been not clarified with PBT. Therefore, in this study, we aimed to investigate the radioactivation effect of metal, including dental metal, with PBT. Our results showed that a Monte Carlo simulation was useful for the identification of produced radionuclides. Furthermore, the increased rate of the deposited dose adjacent the metal against the prescription dose was very slight.

研究分野：放射線科学

キーワード：陽子線治療 放射化 モンテカルロ

1. 研究開始当初の背景

2018 年 4 月より頭頸部癌非扁平上皮癌に対する陽子線治療は保健適応となっており、また、扁平上皮癌に対しても先進医療 A として陽子線治療が実施されている。そのため、国内においても頭頸部癌に対して陽子線治療を行う機会は増えてきており、良好な治療成績も報告されている。

陽子線治療を実施する患者の体内には、歯科金属や脊椎インプラント、人工骨頭などの金属が存在することがしばしばある。金属に陽子線が照射されると、その線量分布は従来の X 線治療よりも大きく擾乱することが広く知られている。そのため、このような患者に対する治療計画では、金属をパスしないようなビームアレンジメントを選択しているが、特に口腔癌などでは歯科金属に腫瘍が近接しており、完全に金属を避けるのは困難な場合がある。そのため線量分布は大きく変化するが、陽子線治療では陽子や二次中性子の影響で金属が放射化する可能性もある。しかしながら、体内金属の放射化の線量分布への影響は未だ明らかにされていない。放射化された金属は治療後も半永久的に体内に存在するため、長期的な患者被ばくが増加する可能性もあり、陽子線治療において検討すべき課題の一つであると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、歯科金属を対象として、陽子線治療における金属の放射化の影響を包括的に評価することを目的とした。放射化の影響は、生成される放射性核種、誘導放射能、金属周囲に付与される線量に着目し、モンテカルロシミュレーションにより評価を行った。

3. 研究の方法

(1) 金属に陽子線を照射した際の放射性核種の同定を行う。金属には本邦で歯科金属として一般的に使用されている金銀パラジウム合金と純チタンを使用する。当施設の陽子線治療装置を使用して、エネルギー150 MeV、Spread-out Bragg Peak (SOBP) 60 mm の陽子線を金属に照射し、放射化した金属を高純度ゲルマニウム半導体検出器で計数を行う。金属は水ファントム中の SOBP 中心に設置する。ここで得られたガンマ線スペクトルより、ピーク位置とピーク面積から放射性核種の同定、及び誘導放射能を計算する。また、モンテカル計算コードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) を使用して実測と同様のシミュレーションを行い、その結果を実測と比較する。これらの検証により、放射性核種の同定を行い、またモンテカルロシミュレーションの有用性を評価する。

(2) 陽子線治療における金属の放射化によって金属周囲への線量の影響を調査する。金属には歯科金属を含む体内金属として一般的に使用されているチタン合金 (Ti-6Al-4V) を使用する。当施設の陽子線治療装置における 210 MeV、SOBP サイズ 60 mm のビームデータを使用し、PHITS によるモンテカルロシミュレーションで金属の放射化を計算する。その後放射化した金属を線源として放出されるガンマ線やベータ線に起因する線量を計算する。また、放射化の陽子線エネルギー依存性を評価するために、水中における陽子線エネルギーがそれぞれ 50, 70, 110, 150, 180 MeV となる深部に金属を設置して評価を行う。

4. 研究成果

(1) 放射性核種の同定

金銀パラジウムと純チタンに対して、150 MeV、SOBP サイズ 60 mm の陽子線ビームを照射した際に生成された放射性核種のモンテカルロシミュレーションの結果を表 1, 2 に示す。また、実測したガンマ線スペクトルを図 1, 2 に示す。これらの結果より実測とシミュレーションで生成された放射性核種はほとんど同じであったため、モンテカルロシミュレーションの有用性を示すことができた。これによって高純度ゲルマニウム半導体検出器を有していない多くの陽子線治療施設においても、モンテカルロシミュレーションにより事前に放射性核種を推定することが可能性であることが示唆された。

表 1 金銀パラジウム合金から生成された放射性核種

Radionuclides	Activity (Bq)	Decay mechanism	Half-life (minites)	Gamma ray energy (keV) and intensities
¹⁰⁸ Ag	4.64E+03	β ⁻ , EC β ⁺	2.4	633.0 (1.8%), 434.0 (0.5%), 618.9 (0.3%)
^{105m} Ag	7.23E+02	EC, IT	7.2	319.2 (0.2%)
⁶² Cu	6.58E+02	EC β ⁺	9.7	875.7 (0.2%), 1173.0 (0.3%)
¹¹⁰ Ag	5.80E+02	β ⁻ , EC	0.41	657.5 (4.5%)
¹⁰⁶ Ag	3.28E+02	β ⁻ , EC β ⁺	24	511.9 (17.0%), 622.0 (0.3%), 873.5 (0.2%)
¹⁰⁵ Cd	1.62E+02	EC	55.5	346.9 (4.2%), 607.2 (3.7%), 961.8 (4.7%)
^{104m} Ag	1.36E+02	EC β ⁺ , IT	33.5	555.8 (90.0%), 1238.8 (3.9%), 2276.7 (2.4%)
^{107m} Ag	1.27E+02	IT	0.74	93.1 (4.7%)
¹⁰³ Cd	8.19E+01	EC β ⁺	7.3	1079.9 (5.0%), 1448.7 (5.1%), 1461.8 (10.8%)
¹⁰⁴ Cd	7.77E+01	EC	55.7	83.5 (47.0%), 559.0 (6.3%), 709.3 (19.5%)

表 2 純チタンから生成された放射性核種

Radionuclides	Activity (Bq)	Decay mechanism	Half-life (minites)	Gamma ray energy (keV) and intensities
⁴⁷ V	1.91E+03	EC β ⁺	32.6	1793.9 (0.2%)
⁴⁵ Ti	3.67E+02	EC β ⁺	184.8	719.6 (0.2%)
¹⁵ O	2.77E+02	β ⁺	2.0	-
^{46m} Sc	1.24E+02	IT	0.3	142.5 (62.0%)
⁴⁴ Sc	1.01E+02	EC β ⁺	238.2	1157.0 (99.9%), 1499.5 (0.9%)
¹⁴ O	8.91E+01	β ⁺	1.2	2312.6 (99.4%)
^{42m} Sc	6.53E+01	EC β ⁺	1.0	437.5 (100%), 1227.0 (99.0%), 1524.5 (99.7%)
⁴⁹ Sc	6.42E+01	β ⁻	57.2	1761.9 (0.05%)
⁵¹ Ti	5.71E+01	β ⁻	5.76	320.1 (93.1%), 608.6 (1.2%), 928.6 (6.9%)
⁴³ Sc	4.20E+01	EC	233.5	372.9 (22.5%)

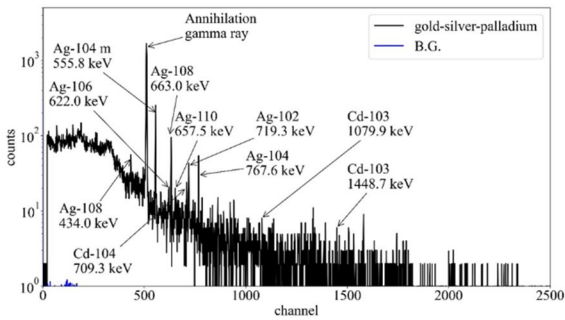


図 1 金銀パラジウム合金から放出されたガンマ線スペクトル

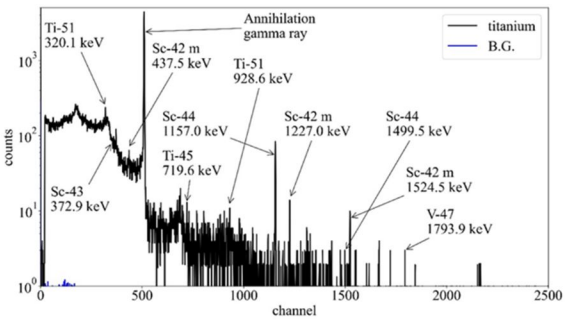


図 2 純チタンから放出されたガンマ線スペクトル

(2) 放射化に起因する金属周囲の線量評価

各深部に設置したチタン合金に陽子線ビームを照射した直後における生成放射性核種を表 3 に示す。生成された放射性核種に陽子線のエネルギー依存性は確認されなかった。また、照射終了直後と照射 24 時間後における放射化した金属周囲の線量分布と、各エネルギーにおけるプロファイルを図 3 に示す。陽子線ビーム照射終了直後は 50 MeV の線量プロファイルが最も広がっていたが、照射 24 時間後には最も線量が低くなっていた。金属から 1 mm の位置における 24 時間の積算線量は、処方線量に対してそれぞれ 0.044%, 0.036%, 0.058%, 0.062%, 0.052% の増加率を示した。これらの結果より、陽子線エネルギーが高くなるほど金属の放射化によって周囲の線量が増加するが、金属から距離が離れるに従い、その影響は急激に小さくなることが示された。

表 3 各陽子線照射直後におけるチタン合金から生成された放射性核種

Proton energy	Radionuclides									
50 MeV	Sc-45m	Al-26m	Sc-46m	V-50	V-46	V-46m	Al-25	Si-27	Mg-23	V-47
70 MeV	Sc-45m	Sc-46m	V-46	Al-26m	V-50	V-46m	Si-27	Na-24m	V-45	Al-25
110 MeV	Sc-45m	Sc-46m	Al-26m	V-50	V-46	V-46m	Si-27	Sc-42	He-6	Cl-38m
150 MeV	Sc-45m	Sc-46m	Al-26m	V-50	V-46	V-46m	Al-25	Ne-19	Cl-38m	K-38m
180 MeV	Sc-45m	Sc-46m	Al-26m	V-50	Sc-42	Si-27	Cl-38m	K-38m	V-46	Ca-39

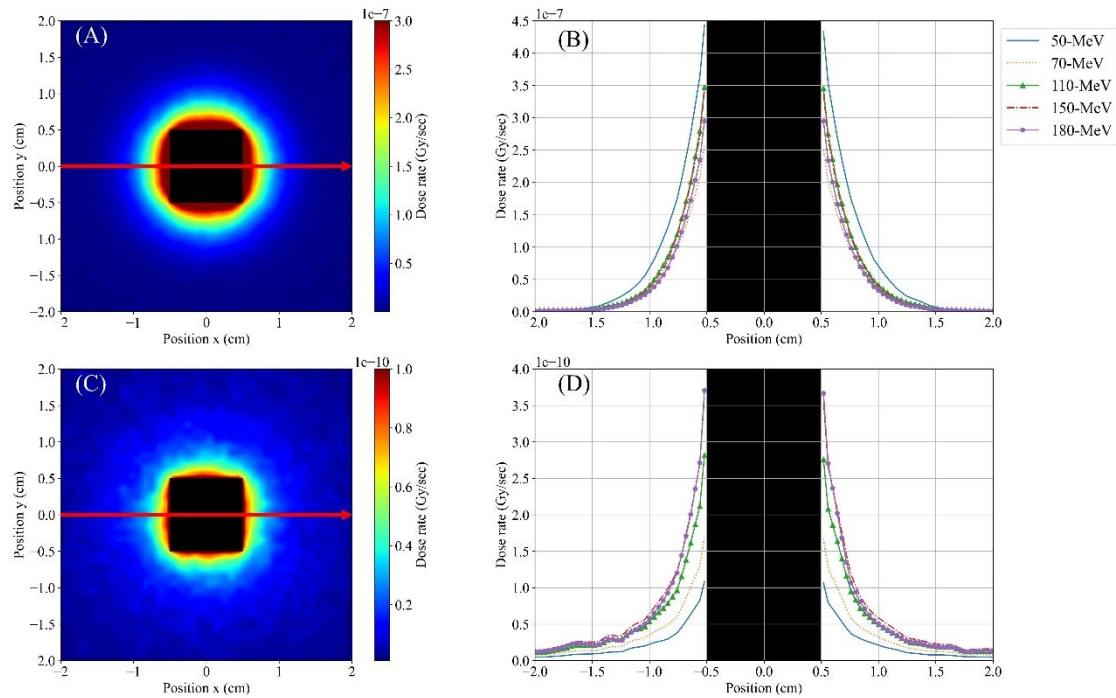


図3 金属周囲の線量分布と各エネルギーのプロファイル

(A) 照射直後における金属周囲の線量分布、(B) 照射直後における各陽子線エネルギーの線量プロファイル、(C) 照射 24 時間後における金属周囲の線量分布、(D) 照射 24 時間後における各陽子線エネルギーの線量プロファイル。

成果のまとめ

本研究では陽子線治療における金属の放射化の影響を評価した。放射性核種を同定するためには、高純度ゲルマニウム半導体検出器などを用いる必要があるが、本研究でモンテカルロシミュレーションの有用性が示されたため、特別な装置を有していない場合でも簡便に実施可能であることが示された。また、放射化に起因する金属周囲の線量は処方線量に対してわずかに増加しており、実臨床における対策としてはマウスピースなどのスペーサを利用するなどして金属から距離を設けることで線量低減可能であることが明らかとなった。金属の放射化ではガンマ線だけでなく、生成放射性核種自体が金属から放出される可能性がある。このような高 LET 放射線の影響など未だ考慮できていない要素も含まれるが、本研究は陽子線治療における金属の取り扱いに関する指針の一助となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kato Ryohei, Kato Takahiro, Narita Yuki, Sasaki Sho, Takayama Kanako, Murakami Masao	4. 巻 8
2. 論文標題 Identification of Induced Radionuclides Produced from Dental Metals in Proton Beam Therapy for Head and Neck Cancer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Radiation Oncology	6. 最初と最後の頁 101153 ~ 101153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.adro.2022.101153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 加藤亮平、加藤貴弘、相良達彦、佐々木捷、武政公大、成田優輝、小山翔、高山香名子、村上昌雄
2. 発表標題 頭頸部癌陽子線治療における歯科金属の放射化の影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 第121回日本医学物学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Kato, Takahiro Kato, Tatsuhiko Sagara, Yuki Narita, Kanako Takayama, Masao Murakami
2. 発表標題 Effects of the Activated Dental Metal Induced by Proton Beam Irradiation for Head and Neck Cancer: A Phantom Study
3. 学会等名 AAPM 63rd Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤亮平、成田優輝、小山翔、武政公大、加藤貴弘
2. 発表標題 拡大散乱体法を用いた陽子線治療における体内金属の影響評価
3. 学会等名 第11回東北放射線医療技術学術大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高山 香名子 (Takayama Kanako) (60747997)		
研究協力者	加藤 貴弘 (Kato Takahiro) (90778804)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------