

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K08123

研究課題名(和文) 平行磁場による粒子線細胞殺傷効果の増強メカニズムの解明

研究課題名(英文) Effects of longitudinal magnetic field on biological effectiveness of charged-particle therapy

研究代表者

稲庭 拓 (Inaniwa, Taku)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子医科学研究所 物理工学部・グループリーダー

研究者番号：10446536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者等は、粒子線照射時に(1)粒子線の進行方向と平行に外部磁場を掛けると粒子線の細胞殺傷効果が有意に増強され、(2)粒子線の進行方向と直交する方向に外部磁場を掛けても細胞殺傷効果に変化がない、ことを細胞実験で確認した。この平行磁場効果に関して、0.6 T程度の外部磁場では、粒子線の物理的な飛跡構造に有意な変化は現れない、平行磁場の有無によって、OHラジカルの生成密度は変化せず、酸素依存的なH2O2生成は減少する、粒子線照射中に平行磁場を印加した場合のみに発現する間接効果が支配的な役割を果たすこと、などが明らかになった。しかし、機序解明には至っておらず、研究継続が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平行磁場により粒子線の細胞殺傷効果が増強し、直交磁場ではそれが変化しないことは、研究代表者等が初めて確認した現象であり、その機序を解明する本研究テーマは、学術的独自性に富むものである。本現象の機序が明らかになり、この現象が生体内など様々な条件下でも起こることが確認されれば、粒子線治療と平行磁場を組み合わせ、全く新しい効果的な粒子線治療の実現につながる可能性がある。本研究期間内に、磁場方向によって現れる効果が異なることを含め、平行磁場効果の機序解明には至らなかった。しかしながら、本研究により確認された新たな生物・化学・物理的な実験結果は、平行磁場効果の機序解明に資するものである。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the effect of external magnetic fields on biological effectiveness of charged-particle beams. Exposure of human cancer and normal cells to the longitudinal magnetic fields of BL = 0.3 and 0.6 T significantly increased the biological effectiveness of carbon-ion beams, while exposure to the perpendicular magnetic fields of the same strengths did not alter significantly the biological effectiveness. These phenomenon can be used to increase the tumor control probability of radioresistant tumors in the future. However, the underlying mechanisms for the findings have been still unclear. In this study, we conducted physical, chemical, and biological experiments to explore the underlying mechanisms and to investigate the feasibility of the treatments using the observed phenomenon, namely a magneto-particle therapy. We have found additional biological and chemical phenomenon under longitudinal magnetic field. However, the mechanism has not yet been elucidated.

研究分野：医学物理

キーワード：粒子線治療 生物効果 外部磁場

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者等は、粒子線照射時に(1)粒子線の進行方向と平行に0.6 T程度の外部磁場を掛けると粒子線の細胞殺傷効果が有意に増強され、(2)粒子線の進行方向と直交する方向に外部磁場を掛けても細胞殺傷効果に変化がない、ことを細胞実験で確認した。

研究を開始した当初、この現象は、入射粒子により生成された二次電子が、平行磁場によるローレンツ力を受け、その移動範囲が入射粒子の飛跡近傍に制限されることにより、飛跡周辺の電離密度が高まり、結果として粒子線の細胞殺傷効果が高まったと考えられた。しかし、電子のラーマ半径と水中飛程との関係を調べると、0.6 T程度の磁場では、電子(運動エネルギー ≤ 1 MeV)の水中飛程はラーマ半径よりも極めて小さいことが解ってきた。つまり、そのようなエネルギーの二次電子は、回転運動をする前に止まるため、入射粒子の飛跡周辺の電離密度を有意に高めることはできないと考えられる。本現象のメカニズムとして、(i) DNA 損傷応答の幾つかの過程が磁場によって変化した、(ii) 活性酸素種の生成量や寿命が磁場によって変化した、(iii) 非標的効果を促す細胞間のシグナル伝達が磁場によって変化した、などの仮説が立つ。しかし、増強効果が平行磁場でのみ観測されたことを含めて、本現象の機序を説明できる仮説は無かった。しかしながら、本研究により平行磁場による粒子線の細胞殺傷効果の増強メカニズムが明らかになり、この現象が生体内など様々な条件下でも起こることが確認されれば、粒子線治療と平行磁場を組み合わせ、新しい効果的な粒子線治療の実現できるだけでなく、粒子線施設の小型化やコストダウンにも繋がる可能性がある。

2. 研究の目的

研究代表者等は、粒子線照射時に

- ・ 粒子線の進行方向と平行に外部磁場を掛けると粒子線の細胞殺傷効果が有意に増強される
 - ・ 粒子線の進行方向と直交する方向に外部磁場を掛けても細胞殺傷効果に変化がない
- 外部磁場下で行った細胞実験で確認した。しかしながら、この現象のメカニズムについては解明されていないのが現状である。そこで本研究では、本現象のメカニズムを、物理的、生物学的、化学的な側面から解明するとともに、本現象を用いた新たな粒子線治療法の実現可能性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

全ての粒子線照射実験は、量子科学技術研究開発機構の医療用加速器 HIMAC の物理実験コース SB1 ポートにて行った。平行磁場および直交磁場の発生装置として図 1(a)、(b)に示すソレノイド電磁石とダイポール電磁石を用いた。各電磁石の最大中心磁場強度は0.60 テスラ (300 A) および0.67 テスラ (50A)であり、流す電流値を変えることにより任意の強度の外部磁場を印加できる。これらの電磁石をSB1 ポートのアイソセンター位置に設置した。電磁石のボア内に照射対象物を設置することで、外部磁場下での照射が可能となる。

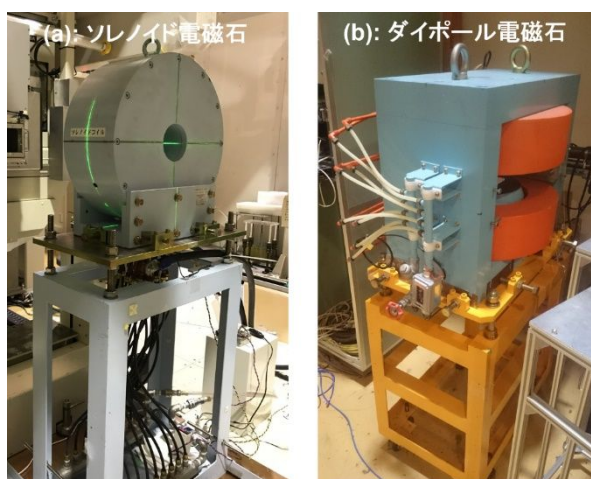


図 1. (a) 平行磁場発生用ソレノイド電磁石、(b) 直交磁場発生用ダイポール電磁石の写真

3.1 磁場の印加タイミングの増強効果への影響

平行磁場によって細胞の放射線感受性が変化する、または、それにより修復能が変化することが本現象の機序であるならば、平行磁場を炭素線照射の前後に照射しても細胞殺傷効率の増強が生じるはずである。そこで、LET が 13 keV/ μ m と 50 keV/ μ m の炭素線を照射する直前、最中、直後に、人耳下腺がん細胞 (HSGc-C5) に対して 0.3 T の平行磁場を印加し、細胞生残率を

測定した。

3-2 細胞内 DNA 損傷の観察・評価

平行磁場による重粒子線の細胞殺傷効果の増強現象が、DNA 損傷および修復経路への影響によるものかを調べることは重要である。そこで、細胞に最も重篤な損傷であり細胞死に影響する DNA 二重鎖切断と、重粒子線によって誘導される“複雑な”DNA 二重鎖切断の生成およびその後の修復に平行磁場が影響するかを調べた。平行磁場有り、無しの場合でヒト正常細胞 (NB1RGB) に対して、350 MeV/u の炭素線 (12 keV/μm) と鉄線 (222 keV/μm) を照射した。照射により細胞核内に生じた DNA 損傷を H2AX (DNA 二重鎖切断マーカー) およびリン酸化 RPA (複雑な DNA 損傷マーカー) で免疫蛍光染色することで、細胞核内の DNA 損傷マーカーの量・局在・動態を解析した。

3-3 OH ラジカルの生成量測定

粒子線照射により生じる OH ラジカルの生成量が平行磁場が影響するかを調べる実験を行った。EPR スピントラッピング剤 (DMPO) 濃度の異なる反応溶液に炭素線を一定線量 (16 Gy) 照射し、反応溶液中に生じる DMPO-OH を X-band EPR で測定し OH ラジカルの生成濃度を求めた。DMPO-OH 濃度を DMPO の密度に対してプロットするとき得られる 3 相を示す曲線の 1 相目と 2 相目が作る肩の高さが、炭素線照射時の磁場の有無に応じて変化するか否かを観察した。

3-4 過酸化水素の生成量測定

粒子線照射により生じる過酸化水素 (H₂O₂) の生成量が平行磁場が影響するかを調べる実験を行った。大気下または低酸素条件下の水試料 (milli-Q) に平行磁場を付加した状態で、炭素線または鉄線を照射し、照射した水試料にスピントラッピング試薬である DMPO を添加し、UV を照射した。UV 照射により水試料中の H₂O₂ が OH ラジカルに分解され、これを DMPO でトラップして生じた DMPO-OH を EPR で測定した。既知の濃度の過酸化水素水を使って予め検量線を得ておき、照射した水試料中の H₂O₂ を定量した。

3-5 細胞死に占める間接効果の寄与率測定

平行磁場による細胞殺傷効果の増強が、直接効果または間接効果のどちらによって引き起こされているかを定量的に評価するため、濃度の様々に異なる DMSO (OH ラジカルの捕捉剤) 溶液中で培養した HSGc-C5 に対して、平行磁場有り、無しの場合で、350 MeV/u の炭素線を照射する実験を行った。様々な濃度の DMSO 溶液中で照射された細胞の生残率をコロニー形成法で定量することで、DMSO 濃度無限大 (OH ラジカルによる間接効果の寄与を完全に除去した状態) での細胞生残率 (直接効果のみの寄与) を推定した。

3-6 動物実験

細胞実験で観測された平行磁場効果が、動物実験でも再現するか、また、どの程度の効果があるかは、磁気粒子線治療を開発する上で根幹となる情報である。そこで、下肢にマウス由来の扁平上皮癌 (SCCV11) を移植したマウスに対して 350 MeV/u の炭素線 (5, 10 Gy) および 350 MeV/u の鉄線 (2, 4 Gy) を局所照射し、平行磁場の有無による腫瘍増殖抑制効果 (tumor grows delay) の変化を観測した。

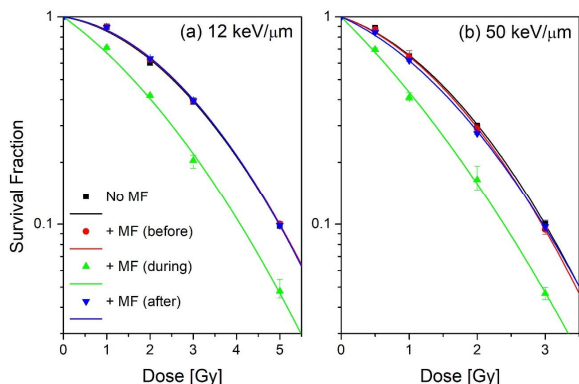


図2 0.3 T の平行磁場を、炭素線 (左: 13, 右: 50 keV/μm) 照射の直前、最中、直後に印加した場合の HSGc-C5 細胞の生残率。

は、平行磁場によって遅くなる傾向があり、高線量 (4 Gy, 8 Gy) では有意な遅延が見られた。また、重粒子線による複雑な DNA 損傷 (RPA リン酸化量) は平行磁場によって有意に増加した。

4. 研究成果

4-1 磁場の印加タイミングの増強効果への影響

炭素線を照射する直前、最中、直後に、HSGc-C5 に対して 0.3 T の平行磁場を印加し、細胞生残率を測定した結果を図 2 に示した、どちらの LET の炭素線についても、細胞殺傷効率の増強は、炭素線照射中に平行磁場を印加したときのみ観測された。これにより、外部磁場による放射線感受性や修復能の変化が本現象の機序ではないことが明らかになった。この成果は学術論文として発表した。

4-2 細胞内 DNA 損傷の観察・評価

重粒子線照射によって生じる DNA 初期損傷は、平行磁場の有無によって影響されなかった。しかし、重粒子線照射後の DNA 修復効率は、平行磁場によって遅くなる傾向があり、高線量 (4 Gy, 8 Gy) では有意な遅延が見られた。

pRPA foci, Fe 2Gy, Horizontally, post 4h

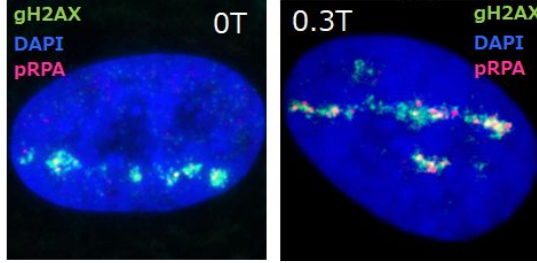


図3 磁場なし(左)、平行磁場0.3 T(右)の条件下で鉄線を照射することで生じた複雑なDNA損傷を、照射4時間後にpRPAで蛍光染色して得られた画像。

一例として、NB1RGBに対して鉄線2 Gyを照射し、照射4時間後にpRPAで蛍光染色した細胞核の画像を図3に示した。これらの結果から、平行磁場によって、重粒子線誘導性の複雑なDNA損傷が増えることにより、DNA修復効率が低下し、細胞生存率が下がったと考えられる。

4-3 OHラジカルの生成量測定

平行磁場下で、DMPO濃度の異なる反応溶液に炭素線を照射し、DMPO-OH濃度をX-band EPRで測定し、DMPO濃度に対してプロットした図を図4に示した。磁場によって電離密度が高くなれば、OHラジカルの生成密度も高くなり、肩が小さくなると予想された。しかしながら、平行磁場の有無によって、炭素線照射により生じるOHラジカルの生成密度に有意差は生じなかった。

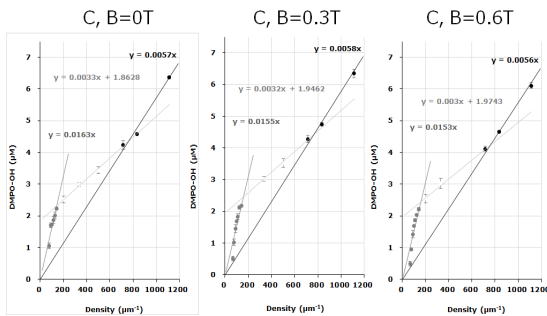


図4 平行磁場下(左図:0 T、中央図:0.3 T、右図:0.6 T)で、DMPO濃度の異なる反応溶液に炭素線を照射し、DMPO-OH濃度をX-band EPRで測定し、DMPO濃度に対してプロットした図。

4-4 過酸化水素の生成量測定

図5に、炭素線および鉄線を照射した場合のH₂O₂の収量を示した。炭素線では平行磁場を付加することで酸素非依存的なH₂O₂生成が減少した(A)。鉄線では、酸素非依存的なH₂O₂生成には変化がなかったが、酸素依存的なH₂O₂生成は減少した。これらの結果から、平行磁場により初期活性種の生成密度あるいは反応性に何らかの変化が生じたと考えられる。この成果については、OHラジカルの生成量測定の結果とともに学術論文として発表した。

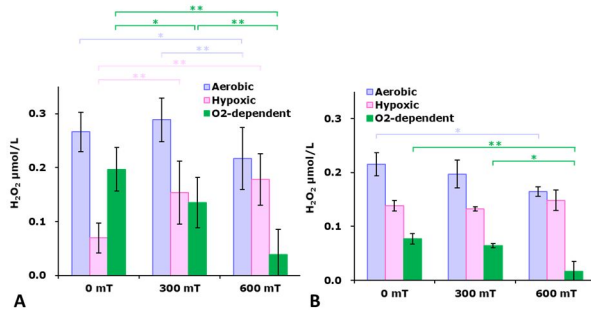


図5 水試料中でのH₂O₂生成量に対する磁場の影響。(A)炭素線によるH₂O₂生成。(B)鉄線によるH₂O₂生成。大気下および低酸素条件下(O₂ < 0.1%)での生成量およびその差(酸素依存的なH₂O₂生成)。

4-5 細胞死に占める間接効果の寄与率測定

図6に、磁場なし、平行磁場0.6 Tの条件下で、HSGC-C5細胞に350 MeV/uの炭素線を照射したときの細胞生存率と、そこに占める直接効果と間接効果の寄与割合を示した。平行磁場の示した通り、平行磁場による細胞殺傷効果の増強現象において、間接効果が支配的な役割を果たしていることが分かった。4-4の研究成果により、粒子線照射で生じるmmol/LレベルのOHラジカルの生成密度は、平行磁場によって有意に変化しないことが確認されている。これらの実験結果から、外部磁場によってOHラジカルの不対電子のスピンの向きに偏極が生じ、ラジカル結合阻害が起こり、結果的に反応性の高いOHラジカルの寿命が延びた可能性が考えられる。

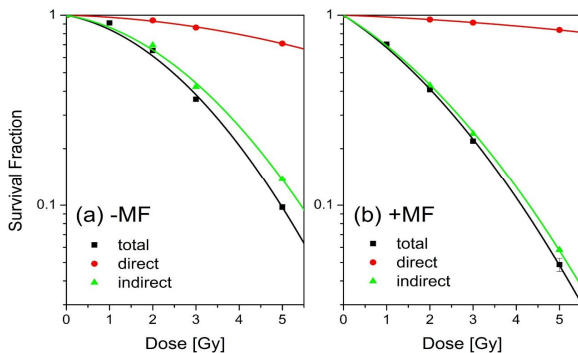


図6 磁場なし(左)、平行磁場0.6 T(右)の条件下で、HSGC-C5細胞に350 MeV/uの炭素線を照射したときの細胞生存率(黒)と、そこに占める直接効果(赤)と間接効果(緑)の寄与割合。

4-4 動物実験

各照射条件での腫瘍サイズの変化を照射日からの経過日数の関数として調べた。その結果、炭素線および鉄線のどちらの線種についても、平行磁場0.6Tによる有意な腫瘍増殖抑制効果は認められなかった。

平行磁場による粒子線細胞殺傷効果の増強現象(平行磁場効果)に関連して、0.6 T程

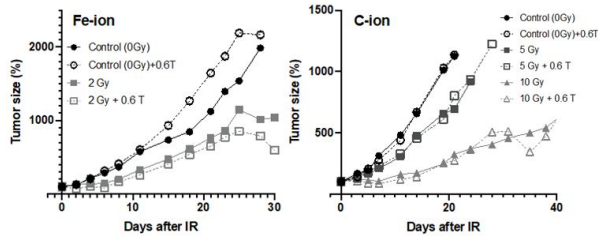


図6 下肢に SCCVII を移植したマウスに対して鉄線（左図）および炭素線（右図）を局所照射し、照射日からの経過日数の関数として腫瘍サイズをプロットした図。

重粒子線誘導性の複雑な DNA 損傷が増えること、平行磁場による細胞殺傷効果の増強現象において、間接効果が支配的な役割を果たしていること、など様々なことが明らかになった。しかしながら、本現象の機序解明には至っておらず、今後も継続して研究を進める必要がある。ただし、細胞実験で観測された平行磁場効果は動物実験では再現されなかった。

度の外部磁場では、粒子線の物理的な飛跡構造に有意な変化は現れないこと、平行磁場の有無によって、炭素線照射により生じる mmol/L レベルの OH ラジカルの生成密度に有意な変化は生じないこと、平行磁場の有無によって、炭素線照射により生じる酸素依存的な H_2O_2 生成は減少すること、

平行磁場効果は、炭素線照射中に平行磁場を印加した場合に発現し、照射前後に印加しても発現しないこと、平行磁場効果は、過剰細胞殺傷効果が現れる高 LET 放射線でも発現すること、平行磁場によって、

平行磁場による細胞殺傷効果の増強現象に

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inaniwa Taku, Weichert Emely, Masuda Takamitsu, Tanaka Sodai, Matsufuji Naruhiro, Kanematsu Nobuyuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Stopping-power ratio of body tissues with updated effective energies and elemental I values for treatment planning of proton therapy?and ion beam therapy with helium, carbon, oxygen, and neon ions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Radiological Physics and Technology	6. 最初と最後の頁 319 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12194-023-00721-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakata Dousatsu, Lee Sung Hyun, Tran Linh T, Pan Vladimir, Nakaji Taku, Mizuno Hideyuki, Kok Angela, Povoli Marco, Rosenfeld Anatoly, Inaniwa Taku	4. 巻 67
2. 論文標題 Microdosimetric investigation for multi-ion therapy by means of silicon on insulator (SOI) microdosimeter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 215010 ~ 215010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/ac8968	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakata Dousatsu, Suzuki Masao, Hirayama Ryoichi, Abe Yasushi, Muramatsu Masayuki, Sato Shinji, Oleg Belov, Ioanna Kyriakou, Dimitris Emfietzoglou, Susanna Guatelli, Sebastien Incerti, Inaniwa Taku	4. 巻 13
2. 論文標題 Performance Evaluation for Repair of Hsgc-c5 Carcinoma Cell Using geant4-Dna	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cancers	6. 最初と最後の頁 6046-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cancers13236046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taku Inaniwa, Nobuyuki Kanematsu, Makoto Shinoto, Masashi Koto, Shigeru Yamada	4. 巻 66
2. 論文標題 Adaptation of stochastic microdosimetric kinetic model to hypoxia for hypo-fractionated multi-ion therapy treatment planning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 205007-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/ac29cc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Inaniwa, Y. Abe, M. Suzuki, S. H. Lee, K. Mizushima, T. Nakaji, D. Sakata, S. Sato, Y. Iwata, N. Kanematsu, T. Shirai	4. 巻 66
2. 論文標題 Application of lung-substitute material as ripple filter for multi-ion therapy with helium, carbon-, oxygen-, and neon-ion beams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 055002-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/abde99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Matsumoto, I. Nakanishi, Y. Abe, S. Sato, M. Muramatsu, R. Kohno, D. Sakata, K. Mizushima, S. H. Lee, M. Sakama, T. Inaniwa	4. 巻 55
2. 論文標題 Effect of loading a longitudinal magnetic field to the linear particle-beam track on yields of reactive oxygen species in water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Free Radical Research	6. 最初と最後の頁 547-555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10715762.2021.1970151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Inaniwa, M. Suzuki, S. Sato, M. Muramatsu, A. Noda, Y. Iwata, N. Kanematsu, T. Shirai, K. Noda	4. 巻 106
2. 論文標題 Effect of external magnetic fields on biological effectiveness of proton beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.	6. 最初と最後の頁 597-603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrobp.2019.10.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 V. Patera, Y. Prezado, F. Azaiez, G. Battistoni, D. Bettoni, S. Brandenburg, A. Bugay, G. Cuttone, D. Dauvergne, G. France, C. Graeff, T. Haberer, T. Inaniwa, S. Incerti, E. Nasonova, A. Navin, M. Pullia, S. Rossi, C. Vandevoorde, M. Durante	4. 巻 8
2. 論文標題 Biomedical research program at present and future high-energy particle accelerators.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 380-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2020.00380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Sakata, O. Belov, M-C. Bordage, D. Emfietzoglou, S. Guatelli, T. Inaniwa, V. Ivanchenko, M. Karamitros, I. Kyriakou, N. Lampe, I. Petrovic, A. Ristic-Fira, W-G. Shin, S. Incerti	4. 巻 10
2. 論文標題 Fully integrated Monte Carlo simulation for evaluating radiation induced DNA damage and subsequent repair using Geant4-DNA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20788-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-75982-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Taku Inaniwa
2. 発表標題 Quantum Scalpel research project at QST
3. 学会等名 MMND2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taku Inaniwa
2. 発表標題 Radiation Biology for Particle Therapy Treatment Planning
3. 学会等名 PTCOG-AO 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taku Inaniwa
2. 発表標題 Mechanistic biological model for charged-particle therapy treatment planning
3. 学会等名 AOCMP 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taku Inaniwa
2. 発表標題 Radiation biology and biological modeling for ion beam therapy
3. 学会等名 IUPESM WC2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taku Inaniwa
2. 発表標題 Physical and biological models for carbon-ion radiotherapy treatment planning
3. 学会等名 Carbon Ion Therapy Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taku Inaniwa
2. 発表標題 Current status and future perspective of heavy-ion therapy at NIRS, QST
3. 学会等名 GSI biophysics seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Matsumoto
2. 発表標題 Effect of longitudinal magnetic field to the linear particle beam track on yields of hydroxyl radical and hydrogen peroxide in water
3. 学会等名 20th Biennial Meeting of SFRR international (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Inaniwa
2. 発表標題 Stochastic microdosimetric kinetic model for hypo-fractionated multi-ion therapy
3. 学会等名 MMND 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Inaniwa
2. 発表標題 Nuclear applied physics and biophysics at HIMAC
3. 学会等名 IBC 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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 分担者	松本 謙一郎 (Matsumoto Kenichiro) (10297046)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学研究所 放射線規制科学研究部・グループリーダー (82502)	
研究 分担者	鈴木 雅雄 (Suzuki Masao) (70281673)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子医科学研究所 重粒子治療研究部・専門業務員 (82502)	

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
---------	---------