

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K11935

研究課題名（和文）量子ビームで生成するトラックポテンシャルの階層構造と飛跡構造の関係を探る

研究課題名（英文）Study of the relationship between hierarchic structure of track potential and track structure produced by quantum beams

研究代表者

森林 健悟（Moribayashi, Kengo）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子生命科学研究所・上席研究員

研究者番号：70354975

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）：本課題では、トラックポテンシャル(量子ビーム照射で生成する電場)と飛跡構造(エネルギー付与の空間分布)との関係、及び、この照射によるプラズマ生成過程の解明を目指したシミュレーション研究を行った。この解明は重イオンビーム癌治療が高い治療効果を持つ理由の理解に繋がることが期待できる。

この研究では、重イオン、クラスターイオン照射を取り扱った。上述の関係等の解明を目指して、(i)トラックポテンシャルから脱出する二次電子(イオン衝突電離で生じる電子)の確率、(ii)二次電子の熱平衡化、(iii)動径線量(入射イオンの軌道からの距離の関数で表した局所領域の線量)を計算した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界で初めて重イオン及びクラスターイオン照射で生じる二次電子がトラックポテンシャルに捕獲されるシミュレーションモデルを開発し、二次電子の熱平衡化、及びプラズマを生成過程をシミュレートすることに成功した。このプラズマが生成することは、理論的には、予測されており、理論で求めたプラズマがもたらす生物効果は重粒子線癌治療の治療計画に導入されているが、不明な点も多かった。この研究でこの生成過程等を詳細に解明した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to elucidate the relationship between the hierarchic structure of track potential (which is space distribution of energy deposition) and track structure (which is the electric field) and the production processes of plasma irradiated by quantum beams. This study is expected to clarify the reason why heavy ion has high biological effect in cancer therapy.

We treated irradiation of heavy ions and cluster ions. To elucidate the relationship and the production processes mentioned before, we studied (i)probabilities of secondary electrons escaping the track potential, (ii)thermalization of secondary electrons, and (iii)radial dose, which is the dose in the local reaction as a function of the distance from the incident ion path, through simulations, where a secondary electron is the electron produced by ionization due to incident ion impact.

研究分野：量子ビーム、原子分子物理、プラズマ物理

キーワード：イオン照射 二次電子の運動 トラックポテンシャル 熱平衡化 プラズマ シミュレーション クラスターイオン

1. 研究開始当初の背景

重粒子線癌治療は他の放射線治療に比べて少ない線量で治療ができるため、体に優しい治療法と言われ世界中に普及している。しかしながら、何故、少ない線量で治療できるのかは、よくわかっていない。その理由の1つとして考えられている重粒子線照射で生じるプラズマの生体への影響に注目した。このプラズマは、入射粒子線の軌道付近の局所領域の線量を大きくするというモデルがある。しかしながら、このような実用的な医療応用があるにもかかわらず、このプラズマは理論研究しか行われておらず、プラズマの生成機構や細胞に与える影響等不明な点が多い。そこで、プラズマを生成させるトラックポテンシャル(量子ビーム照射で生成する電場)とプラズマに影響を受ける飛跡構造(エネルギー付与の空間分布)との関係の解明の研究を行った。

さらに、量子ビームの種類によって生成するイオンの空間分布が一次元、二次元、三次元と次元の階層が異なるようになるが、そのとき生じるトラックポテンシャルの構造が階層によって変わり次元の大きさと共に急激に大きくなるのが理論からわかった。量研でクラスターイオンの生物影響の実験[1]の計画がされていたが、この場合、生成するイオンが三次元に分布する。そこで、クラスターイオン照射でのトラックポテンシャルの階層構造を理解するためのシミュレーションモデルを開発することにした。

2. 研究の目的

重イオン、クラスターイオン照射で生じるトラックポテンシャルと飛跡構造との関係、この照射によるプラズマ生成機構を解明することを目指す。この解明は重粒子線癌治療の機構解明に役立つことが期待できる。

3. 研究の方法[2]

ここで開発したシミュレーションモデルでは、従来のモデルと同様にイオン衝突過程において、二体衝突(本来は、多体間の衝突を考慮しなければならないが、最も強い相互作用をする二原子間の衝突だけを考慮する)モデルを使用した。それに加えて、入射イオンの軌道付近に生じる電場の二次電子の運動への影響も考慮した。理論研究には、この電場を考慮したモデルがあり、それが重粒子線癌治療の治療計画に使われている。一方、シミュレーションでこの電場を考慮したのは、知る限り、この研究が初めてである。理論モデルでは、正電荷による電場(F_{ei})のみが考慮されたモデルであるが、本モデルでは、それに加えて他の二次電子間による電場(F_{ee})も考慮した。これにより、電子密度やデバイ長等のプラズマパラメーター、及び、二次電子の熱平衡とプラズマ生成の関係の解析ができる。ここで、デバイ長とは、プラズマ中でそれを構成するする荷電粒子が動いて電場を遮蔽する現象(デバイ遮蔽)において、その遮蔽が有効になる長さを指す。

ここで開発したシミュレーション手法のアルゴリズムは以下の通りである。(i) 標的を水とし、標的に液体密度(1g/cc)になるように水分子の位置を決める。時間(t)、及び二次電子数(N_e)を0に設定する。(ii) 一個のイオンを標的に入射させ、標的の中を通過させる。(iii) このイオンの水分子への衝突電離過程による水分子の状態変化を調べ、(iv) 電離が起きた場合、水分子イオンと電離電子を生成させ、 $N_e = N_e + 1$ とし、(v) 電子の初期エネルギーと放出角度を決める。(vi) $N_e > 0$ のとき、電子衝突過程による水分子の状態変化を調べる。(vii) 電子衝突電離が起きたとき、水分子イオンと二次電子を生成させ、 $N_e = N_e + 1$ とし、二次電子の初期エネルギーと放出角度を決める。(viii) 二次電子衝突により状態が変化した場合、その変化に応じて、この衝突に関わった二次電子のエネルギーを減らす。この減少したエネルギーは動径線量(入射イオンの軌道からの関数で表された局所領域の線量)計算に使用する。(ix) 入射イオンと二次電子を Δt 後の場所へ移動させる。その際、二次電子の速度は、分子イオンなどの電荷によるクーロン力を考慮して、変化させる。(x) $t = t + \Delta t$ として、手順 (iii)-(ix) を実行する。(xi) $t > 100$ fs になったとき、イオンを別の場所に入射して[手順(i)の水分子の配置を変えて]、(i)-(x)を実行する。

4. 研究成果

(1) プラズマパラメーターの解析[3]

重粒子線照射で生じる二次電子の発生量、放出角度はイオン衝突断面積(σ)とイオンエネルギー(E_i)の2つのパラメーターで決まる。本研究では、様々な σ 値、 E_i 値に対して、二次電子の運動シミュレーション及びこのシミュレーションから得られたプラズマとプラズマ物理の理論の解析解との比較を行う。

プラズマは、粒子線の軌道に対して円柱対称に生じる、すなわち、動径方向の1次元の問題に帰着できる。プラズマ物理理論で電子密度分布を計算するポアソン方程式の一次元の解は、

$$n_e(r) = A \exp(-r/\lambda_D), \quad (1)$$

となる。ここで、 A 、 r 、 n_e 、 λ_D は、それぞれ、定数、軌道からの距離、電子密度、デバイ長を表す。シミュレーション結果は様々な σ 値、 E_i 値に対して式(1)でほぼ再現することができた(図1にその一例を示す)。

理論により λ_D は $\langle n_e \rangle^{0.5}$ に反比例すること、及び、 $\langle n_e \rangle$ は σ に比例することが示されているので、 λ_D は $\sigma^{0.5}$ に反比例することが予測できる。ここで、 $\langle n_e \rangle$ は n_e の全空間での平均値を表す。図2に $E_i = 500$ keV/u に対するシミュレーション結果から導出した λ_D と σ との関係を示す。理論通り、 λ_D は $\sigma^{0.5}$ にほぼ反比例した。さらに、 λ_D はプラズマの大きさを示す物理量であり、動径線量分布のコア領域(軌道付近でプラズマが存在する領域を指す)の大きさを表す。従来のモデルでは、二次電子の軌道付近に束縛される確率は σ に対して一定値のため、コア領域の大きさは σ に対して一定値だったのに対して、この大きさは σ に反比例することを明らかにした。前述のように二次電子が電場によりコア領域に束縛される確率は σ によって変化するという観測値[4]があるが、従来のモデルでは、この確率は σ に関係なく一定となるため、この観測値を説明できない。一方で、我々のシミュレーション結果の解析により、この観測値の傾向を再現することに成功した。

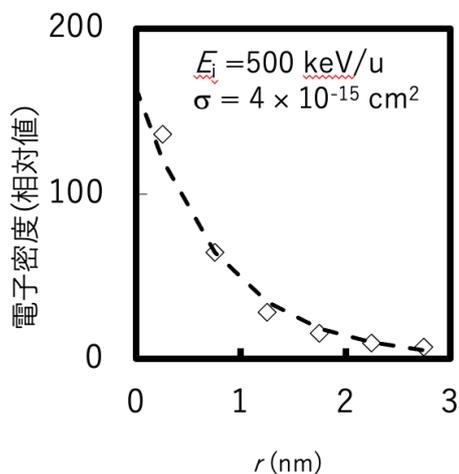


図1 重粒子線の軌道付近で生成するプラズマのシミュレーション結果と解析解(1)式との比較の一例。◇:シミュレーション結果、波線:解析解。

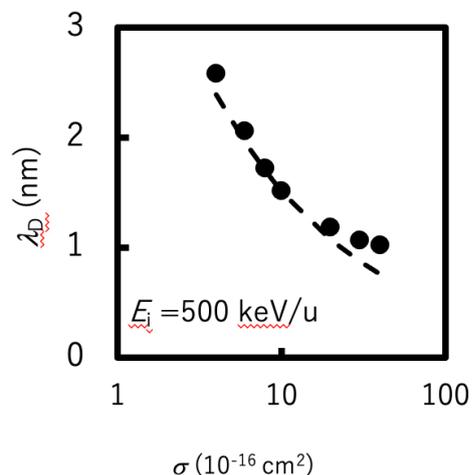


図2 λ_D と σ との関係。●:シミュレーション結果から導出した λ_D 値、波線: $\lambda_D \propto \sigma^{0.5}$ の関係を表す。

(2) F_{ee} の効果[5]

前述のように、このシミュレーションの入力データは、入射イオンの σ とエネルギー(E_i)のみである。図3は F_{ee} を考慮した場合と無視した場合でのシミュレーションで得た n_e と入射イオンの軌道からの距離(r)の関係を示す。ここで、入力データは $\sigma =$ (a) 8×10^{-16} 及び(b) 2×10^{-15} cm^2 、 $E_i = 500$ keV/uとした。この図から F_{ee} を無視すると $r \leq 1$ nmの領域で電子密度が増えていることがわかった。

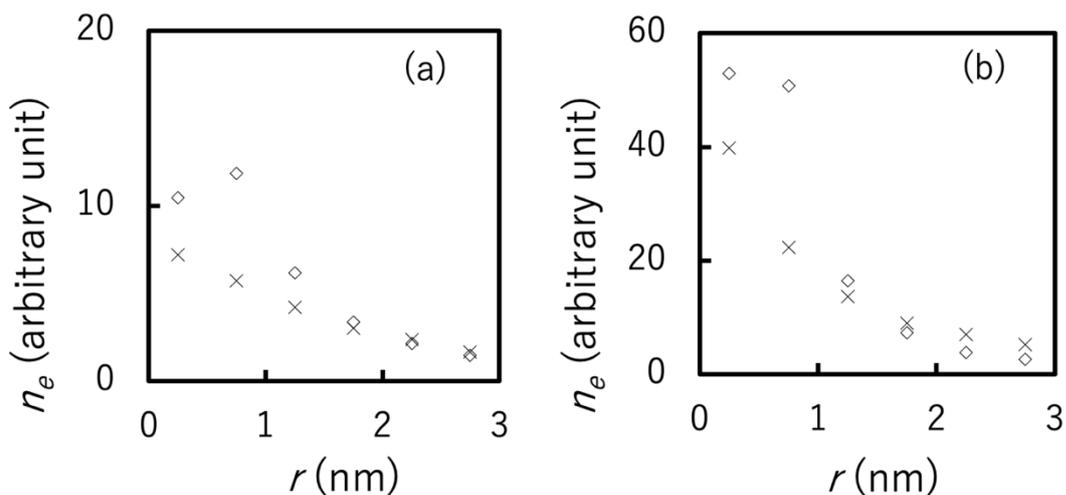


図3 n_e と r との関係。入力データは $\sigma =$ (a) 8×10^{-16} 、(b) 2×10^{-15} cm^2 、 $E_i = 500$ keV/u とした。記号×、◇はそれぞれ、 F_{ee} を考慮した場合と無視した場合を表す。

次に、プラズマ生成における $F_{\bullet\bullet}$ の影響を調べるため、 $F_{\bullet\bullet}$ を考慮した場合と無視した場合の二次電子の入射イオンの軌道付近で生じる電場から脱出できる確率 (P_{es}) を入射イオン衝突電離に対する平均自由行程 (τ) の関数として計算した。脱出できない二次電子がプラズマを形成する。図4は $F_{\bullet\bullet}$ を考慮した場合と無視した場合の P_{es} と τ の関係を示す。 $F_{\bullet\bullet}$ を考慮した場合、無視した場合、 P_{es} はそれぞれ、 $\sqrt{\tau}$ 、 τ に比例すること、すなわち、 $F_{\bullet\bullet}$ は P_{es} を減少させる働きがあることがわかった。これは、 $F_{\bullet\bullet}$ が電場に対して (デバイ) 遮蔽をする働きがあるためと考えることができる。すなわち、 P_{es} の増加はプラズマ電子密度の増加につながり、 $F_{\bullet\bullet}$ はプラズマ生成に不可欠であることを示唆している。

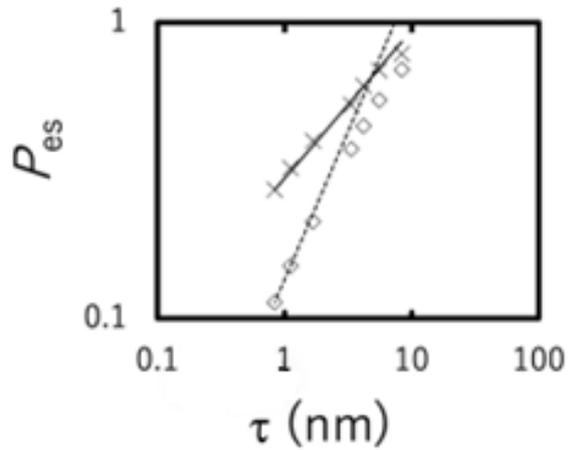


図4 P_{es} と τ の関係。記号 \times 、 \diamond はそれぞれ、 $F_{\bullet\bullet}$ を考慮した場合と無視した場合を表す。実線、破線はそれぞれ、 $\sqrt{\tau}$ 、 τ に比例することを示す。

(3) 二次電子の熱平衡化とプラズマ生成の関係 [6]

重イオン照射では、トラックポテンシャルを生成し、遅い二次電子が入射イオンの軌道付近に束縛されることが実験、シミュレーション両方から報告された。一方、我々の以前のシミュレーション研究では二次電子の運動は数フェムト秒で平衡状態になるという結果を得た [1]。ここでは、平衡状態になるのは二次電子がトラックポテンシャルから脱出する前なのか後なのかなどを様々な二次電子の初期エネルギー分布関数を用いて議論した。

図5に擬似的な初期電子エネルギー分布 $f_1(E_e)$ = $-a E_e^2 + 1$ (分布1)、 $f_2(E_e) = \exp(-c E_e)$ (分布2)、及び、イオンエネルギーが 500 keV の場合の重イオンと水分子の衝突から生じる二次電子の観測を基に算出した分布関数を使用した場合 P_{es} と τ との関係を示した。ここで、 a 、 b は定数値である。この図から P_{es} は分布関数に関係なく、ほぼ同じになることがわかった。このことは、脱出する前に熱平衡になっていること、プラズマが安定な状態になる前に熱平衡状態になることを示唆している。

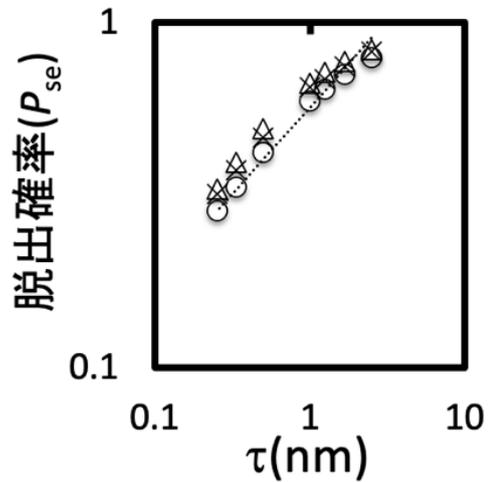


図5 P_{es} と τ との関係。 Δ : 分布1、 \times : 分布2、 \circ : 観測データ、波線 : $(\tau)^{1/2}$ の関数。

(4) クラスタイオン照射の動径線量 [7]

クラスタイオンの照射では、生成する分子イオンが空間的に広がるが、その広がりがトラックポテンシャルと飛跡構造との関係に与える影響を解明することを目指し、この照射のシミュレーション研究を行った。クラスタイオンを構成するイオンの数 (n)、イオン間距離 (R)、 σ と動径線量との関係を明らかにした。

シミュレーションを単純化するため、図6(a)のように、クラスタイオンを構成する n 個の原子半径 R の正 n 角形の位置に配置し、図6(b)のように照射する。図7に $n\sigma = 1.2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ とした場合の様々な n と R に対する動径線量と入射イオンの中心からの距離 (r) [図6(a)参照] の関係を示す。ここで、 $n\sigma$ が一定のとき、クラスタイオン照射で標的中に生成する分子イオンの数は一定となる。ここで、 $n = 1$ は一つのイオンが $r = 0 \text{ nm}$ を $\sigma = 1.2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ で照射する場合を表す。この図から以下のことがわかった。(i) 動径線量は n にほとんど依存しない。(ii) $R = 0.2 \text{ nm}$ では動径線量は $n \geq 2$ と $n = 1$ とでほぼ、同じ値をとる。(iii) $R = 0.5 \text{ nm}$ のときも、 $n \geq 2$ に対する動径線量の最大値は $r \sim 0 \text{ nm}$ であるが、 $n \geq 2$ に対する動径線量は $n = 1$ に対するものより、 $r = 0 \text{ nm}$ 付近でほんの少し小さくなる。(iii) $R \geq 1 \text{ nm}$ に対しては、動径線量の最大値が $r \sim R$ に現れ、また、 $r \sim 0 \text{ nm}$ では一定値をとることがわかった。(iv) $R = 1 \text{ nm}$ では、 $r = 0 \text{ nm}$ 付近と $r \sim R$ とで、動径線量はほぼ、同じ値になったのに対して $R = 2 \text{ nm}$ では $r = 0 \text{ nm}$ 付近の動径線量は $r \sim R$ での動径線量よりも小さくなることわかった。

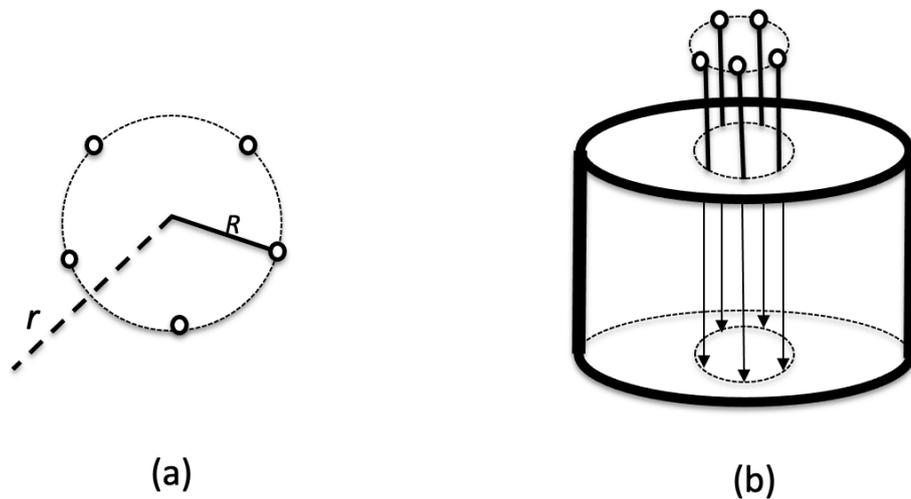


図6 $n = 5$ の場合の (a) 正 n 角形のクラスターイオンを構成する原子の位置 (○の記号で表す)。また、 r は正 n 角形の中心からの距離と定義する。(b) クラスターイオンを構成する原子の標的中の軌道。

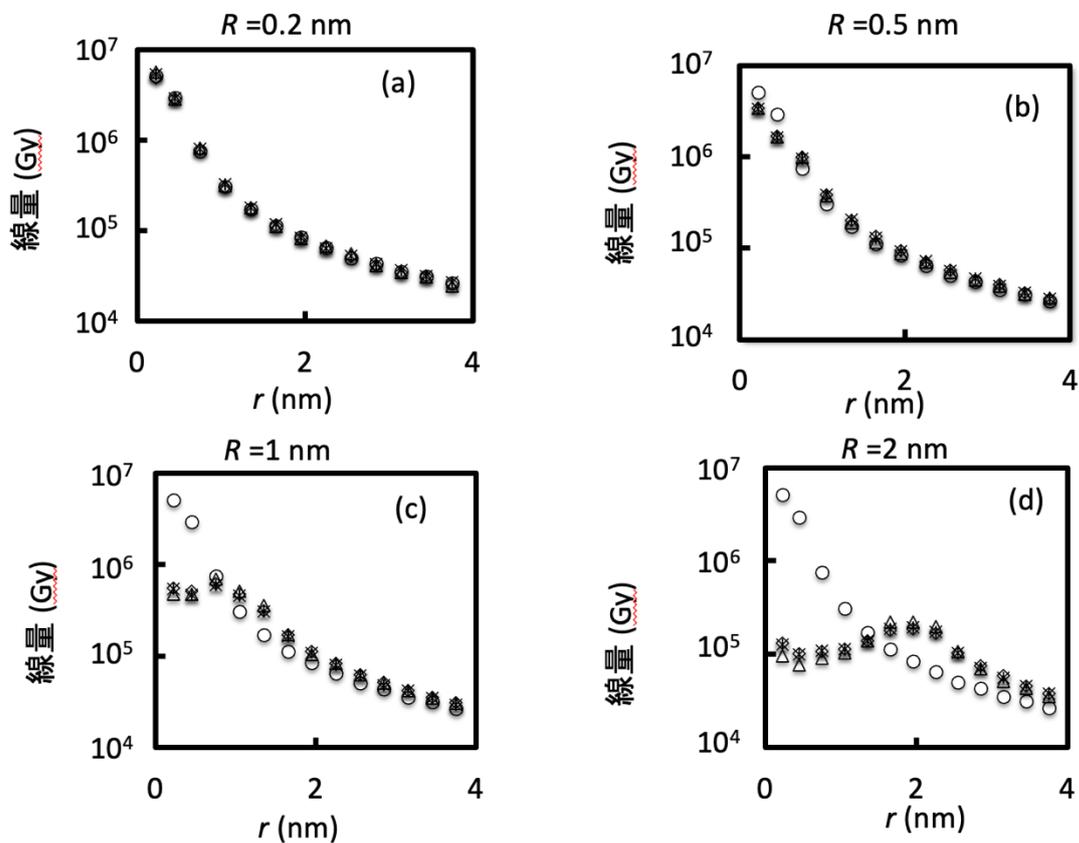


図7 様々な n と R に対する動径線量と入射イオンの中心からの距離 (r) の関係。ただし、 $m\sigma = 1.2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ とした。 $R =$ (a) 0.2、(b) 0.5、(c) 1、(d) 2 nm。 $n = 1, 2, 3, 6$ はそれぞれ、○、△、×、◇の記号で表す。

(参考文献)

- [1] Y. Hase et al., Quantum Beam Science, **5**, 25 (2021)
- [2] K. Moribayashi, Jpn. J. Applied Phys. **59** SH0801(2020)
- [3] K. Moribayashi, Radiat. Phys. Chem., **184** 109436 (2021)
- [4] K. Kimura et al., Nucl. Instru. Methods Phys. Res. B, **193**, 661 (2002)
- [5] K. Moribayashi, J. Phys.: Conf. Series, **2207**, 012020 (2022)
- [6] K. Moribayashi, Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B, **537**, 129(2023)
- [7] K. Moribayashi, Radiat. Phys. Chem., **208**, 110870(2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Moribayashi, H. Matsubara, Y. Yonetani, N. Shikazono	4. 巻 2756
2. 論文標題 Multi-Scale Simulations Aiming To Advance Heavy Ion Beam Cancer Therapy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 030001/1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0140807	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 Kengo Moribayashi	4. 巻 208
2. 論文標題 Effect of closeness between a few atoms forming a cluster ion passing through water on the motion of secondary electrons and radial dose	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 110870/1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.radphyschem.2023.110870	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 Kengo Moribayashi	4. 巻 537
2. 論文標題 Effect of the thermalization of secondary electron energies on plasma formation during the irradiation of heavy ions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 129 ~ 132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nimb.2023.02.014	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 Moribayashi Kengo	4. 巻 2207
2. 論文標題 Effect of Coulomb interaction between secondary electrons on plasma formation due to heavy-ion irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2207/1/012020	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 -

1. 著者名 Yoshihiro Hase, Katsuya Satoh, Atsuya Chiba, Yoshimi Hirano, Kengo Moribayashi, and Kazumasa Narumi	4. 巻 5
2. 論文標題 Proton-Cluster-Beam Lethality and Mutagenicity in Bacillus subtilis Spores	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quantum Beam Science	6. 最初と最後の頁 25-1 25-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/qubs5030025	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 -

1. 著者名 Kengo Moribayashi	4. 巻 184
2. 論文標題 Debye shield formed by track potential and transport of secondary electrons in heavy ion irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 109436/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radphyschem.2021.109436	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 Kengo Moribayashi	4. 巻 59
2. 論文標題 Application of atomic and molecular data for plasma production and cancer therapy by heavy particle irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn. J. Applied Phys.	6. 最初と最後の頁 SH0801_1_7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7c11	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 Kengo Moribayashi	4. 巻 48
2. 論文標題 Heat diffusion in heavy-ion beam irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 X-Ray Spectrometry	6. 最初と最後の頁 708 711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/xrs.3115	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 Moribayashi Kengo	4. 巻 458
2. 論文標題 Erratum to “Radial dose distribution model independent of species of incident ions”	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 190 ~ 195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.07.009	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. Moribayashi	4. 巻 43
2. 論文標題 Application of simple formulas to track potential in heavy-ion-beam simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Materials Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 267-270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14723/tmrj.43.267	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29件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Development of a simulation model aiming to study plasma formation and thermalization of secondary electrons in heavy ion irradiation
3. 学会等名 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators (REI-21) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Radial dose simulations in the irradiation of cluster ions
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 単色X線ナノサイズ領域照射で生じる光電子の加熱効果
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 放射線の局所領域照射で生じる自由電子による加熱とその医療・産業応用
3. 学会等名 「プラズマの分光診断と原子分子素過程の研究フロンティア」研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオン照射で生成する二次電子の運動の熱平衡化
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Application of heavy ion plasma to understand treatment mechanism of heavy ion cancer therapy
3. 学会等名 ICRP-11/GEC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Simulation study to aim to elucidate biological effect due to fast highly-charged ion irradiation
3. 学会等名 20th International Conference on Physics of Highly Charged Ion (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Theory and simulations for plasma created by swift heavy ions
3. 学会等名 29th international conference on atomic collisions in solids & 11th international symposium on swift heavy ions in matter (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビーム照射における二次電子の初期エネルギー分布の影響
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Moribayashi, H. Matsubara, Y. Yonetani, N. Shikazono
2. 発表標題 MULTI-SCALE SIMULATIONS AIMING TO ADVANCE HEAVY ION BEAM CANCER THERAPY
3. 学会等名 1st International Conference on Computational Science & Data Analytics (COMDATA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Application of plasma simulation and theory to heavy ion cancer therapy
3. 学会等名 Conference on Computational Physics (CCP) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビーム照射で形成する自己組織化とDNA損傷の可能性
3. 学会等名 量子生命科学会第3回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビーム照射による散逸構造, 自己組織化形成の可能性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 クラスターイオンが作る動径線量のシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビーム照射におけるデバイ遮蔽の生成過程
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 磁場がイオンビームの生物効果を増大させる理由の検討：熱膨張仮説
3. 学会等名 量子生命科学会 第2回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重粒子がん治療におけるプラズマ物理の役割
3. 学会等名 京都大学 プラズマ科学研究ユニットセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 磁場がイオンビームの生物効果を増大させる理由の検討：熱膨張仮説
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Plasma formed by track potential and transport of secondary electrons in heavy ion irradiation on surfaces
3. 学会等名 第21回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重粒子線がん治療における原子分子・プラズマ物理の役割
3. 学会等名 第45回原子衝突学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Application of atomic and molecular data to heavy ion beam plasma production and further, heavy ion beam cancer therapy
3. 学会等名 International Workshop on Atomic and Molecular Data for Plasma Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Application of nano-sized low-temperature plasma produced from heavy ion irradiation to heavy ion cancer therapy
3. 学会等名 ICPIG & ICRP10 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビームの新規動径線量シミュレーションモデル：従来のモデルとの比較
3. 学会等名 日本物理学会2019年 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 動径線量シミュレーションに使用した次世代型粒子モデルの現状と今後の展望
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 イオンビームに平行に掛かる磁場の生物影響：熱膨張仮説
3. 学会等名 高崎サイエンスフェスタ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビーム照射におけるブラッグピーク付近での温度上昇
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビーム照射によって生じる熱膨張が引き起こすDNA損傷の可能性
3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kengo Moribayashi
2. 発表標題 Role of ion impact ionization cross sections in radiation biology using swift highly charged ion beams
3. 学会等名 19th International Conference: Physics of Highly Charged Ion (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森林 健悟
2. 発表標題 重イオンビームの動径線量シミュレーション
3. 学会等名 理研セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 N. Shiakazono, K. Moribayashi, P.R. Bolton	4. 発行年 2018年
2. 出版社 CRC press Taylor & Francis group, Boca Raton, London, New York	5. 総ページ数 14
3. 書名 Application of laser-driven particle acceleration	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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