

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 17 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：20K08067

研究課題名(和文)重粒子線治療でマルチオン照射を実現するための小型イオン生成システムの開発

研究課題名(英文)Development of a compact-ion production system for multi-ion treatment

研究代表者

片桐 健(Katagiri, Ken)

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・主幹研究員

研究者番号：90510868

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)：数種類のイオンを用いて治療を行うマルチオン照射法のために、既存の重粒子線治療用小型ECRイオン源の1/4程度の小型イオン生成装置(EBIS)を革新的な方法により開発した。本研究課題の研究期間を通じて、(1)新たな小型イオン生成装置であるEBISイオン源の設計・開発、(2)EBISイオン源からのイオンを分析するための低エネルギービームトランスポート及び分析・診断系の整備、(3)上記(1)、(2)を設計・解析するためのPICコード・計算環境の開発・整備、を進めることができた。引き続き本研究テーマを実用化研究へと繋げることを目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QSTにて提案された、治療効果のさらなる向上に繋がるマルチオン照射法の実現は、早急に望まれるものである。現在、世界中で稼働中の重粒子線施設は10施設、建設中の施設は7施設、計画中のものは11施設存在する。日本各地に広がる重粒子線治療施設(千葉、兵庫、群馬、神奈川、佐賀、山形)だけでなく、それら世界中の施設においても、マルチオン照射法の実現のために本研究で開発している小型マルチオン生成システムの適用が考えられる。したがって、本研究は社会的に意義深く、また小型化に繋がる幾つかの新規性を備えた小型EBISの開発のみを考慮しても、学術的にも価値が高いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Multi-ion treatment requires a multi-ion production system which enable to change ion species quickly. A compact Electron-beam ion source (EBIS) with a low-energy hollow electron beam has been developed to realize the multi-ion production system. The following has been performed throughout the study period: (1) development of a new compact EBIS, (2) design and installation of a low-energy beam transport to perform the mass-analysis measurement for ions obtained from the new compact EBIS, (3) development of a particle-in-cell code to analyze the particle trajectories in the compact EBIS and in the beam transport. We will continue the development to realize the super-compact quick-ion-change multi-ion production system for heavy-ion therapy.

研究分野：イオンビーム理工学

キーワード：EBIS イオン源 重粒子線がん治療 マルチイオン治療

1. 研究開始当初の背景

量子科学技術研究開発機構の HIMAC 加速器を用いた重粒子線がん治療は、1994 年の治療開始から 12000 人以上の患者に治療が適用されてきた。これまでの高い治療効果が認められ、放医研を含め全国 6 カ所(千葉、兵庫、群馬、佐賀、神奈川、山形)に治療施設が建設されて治療が行われている。更なる治療効果の向上のために、数種類のイオンを用いて治療を行うマルチイオン照射法¹が提案されている。この方法では、低酸素領域を含む腫瘍中心部には高 LET の酸素やネオンイオン、腫瘍中心部の周辺領域には炭素イオン、正常組織周辺には障害の低減のために低 LET のヘリウムイオンを用いて照射を行い、適切な LET 分布を形成することでより高い治療効果を狙う。この方法を、全国の重粒子線施設にて実用化するためには、これらイオン種を素早く切り替えて供給できるマルチイオン生成システムが必要となる。重粒子線治療で用いられる 3 次元高速スキャニング照射法²では、患者の身体的負担の低減のために、要する治療照射時間を数十秒にまで短縮している。従ってイオン種切り替えに費やす時間もこれと同程度の数十秒、或いはそれ以下であることが望ましい。一方で、既存の重粒子線施設にマルチイオン生成システムを設置するには、スペースの制限から、それらの施設で一般的に用いられる小型 ECR イオン源³程度の大きさでなければならない。これらの問題の 1 つの解決法として、小型 ECR イオン源よりもさらに小さいイオン生成装置をイオン種の数だけ並列に並べて、各イオンを素早く切り替えて供給する方法が提案できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マルチイオン照射法を重粒子線施設で実現するために、小型 ECR イオン源の 1/4 程度の大きさの軽イオン生成に特化した小型イオン生成装置を開発し、それらを 4 つ組み合わせた小型マルチイオン生成システムの実現可能性を検討することである。本研究では、電子ビームによるイオン生成法を検討する。

3. 研究の方法

電子ビームによるイオン生成法を用いた同系統のイオン源として EBIS(Electron-beam ion source)がある。これまでの EBIS では、重元素・多価イオンの生成を目的としているために、電子ビームエネルギーと電子ビーム電流密度の値は非常に高く、炭素等の軽イオンの生成だけを目的とした場合には最適では無い。ビーム電流密度の増強に必要な強磁場の発生のために超伝導電磁石が必要となり、その結果として装置は巨大化している。

本研究では、マルチイオン照射法のための軽イオン(He^{2+} , C^{5+} , O^{6+} , Ne^{7+})の生成に特化し、かつ小型化・低コスト化を狙った小型イオン生成装置を開発するために、これまでの EBIS とは一線を画すイオン生成装置の開発を行う。重粒子線治療用小型シンクロトロン⁴の周回粒子数である 10^9 個のイオンを 1 度の入射で供給するためには、入射器・輸送系の効率を考慮すると、小型イオン生成装置は 10^{10} 個のイオンを生成しなければならない。さらに生成するイオンの価数(最大で Ne^{7+} の $q=7$)を加味すると、小型イオン生成装置には、(i)1 価イオン換算で 10^{11} 個のトラップ容量が要求されることとなる。また、生成したイオンを後段の小型入射器で加速させるためには、(ii)質量電荷比 $q/M \geq 1/3$ の軽イオンの生成できることが要求される。さらに、上記の通り(iii)4 つ組み合わせ構成される小型マルチイオン生成システムは、小型 ECR イオン源と同程度の大きさになることも要求される。

本研究では、これら(i)-(iii)の条件を満たす小型イオン生成装置の開発を目指して、空間電荷効果を考慮に入れた電子ビームの軌道を PIC コード⁵により解析し、適切な内部電極形状の検討を行う。その結果を考慮して小型イオン生成装置を設計し製作を行う。製作された小型イオン生成装置を用いて、イオン生成量等の測定を実施し小型イオン生成装置の性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) PIC 法による電子ビーム軌道解析と小型イオン生成装置の設計

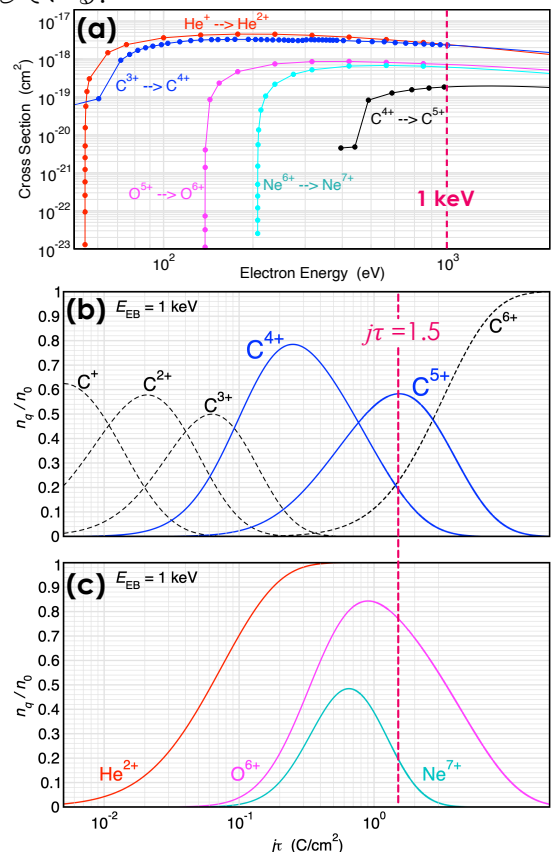


図 1. (a) He^{2+} , C^{5+} , O^{6+} , Ne^{7+} イオンのイオン化断面積, (b) C^{q+} イオンの n_q/n_0 と $j\tau$ の関係, (c) He^{2+} , O^{6+} , Ne^{7+} イオンの n_q/n_0 と $j\tau$ の関係.⁶

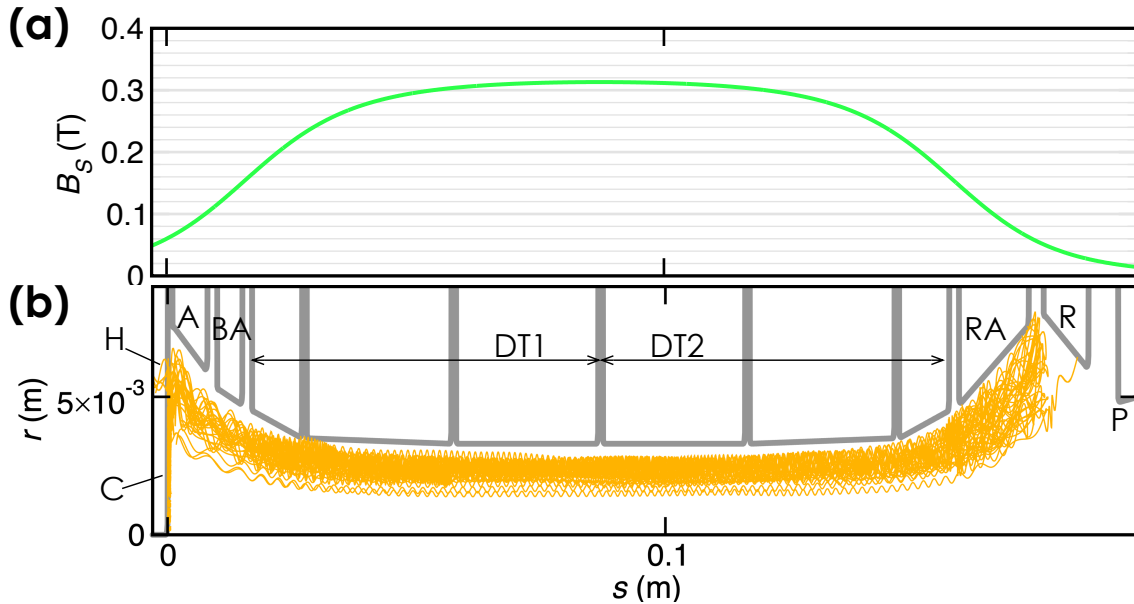


図 2. (a)小型イオン生成装置にて用いられる軸方向(s)磁場分布, (b)中空形状で陰極(C)からリペラー(R)方向へ輸送される電子ビーム.⁶ C: 陰極; A:陽極; BA:バリア陽極; DT1/2: ドリフトチューブ; RA: リペラー陽極; R: リペラー; P: 引き出し電極.

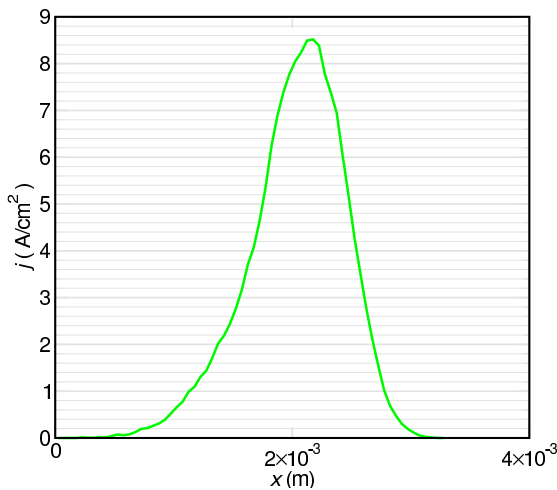


図 3. 電子電流密度 j の x 軸方向($\perp s$ 軸)分布. $x=0$ は中心軸(s 軸)上.

PIC 解析による小型イオン生成装置の幾何学設計を実施する前に, 上記条件(ii)を満たしうる ionization factor $j\tau$ (電子ビーム電流密度 j と閉じ込め時間 τ の積)を定めるために, レート方程式による見積もりを行った. 図 1(a)は, この見積もりに用いた He^{2+} , C^{5+} , O^{6+} , Ne^{7+} イオンのイオン化断面積, 図 1(b)は炭素イオンに関するレート方程式による見積もりの結果であり, 全生成イオン n_0 と各イオンの生成数 n_q の比 n_q/n_0 を $j\tau$ の関数として示したものの, 図 1(c)は同様にその他の He^{2+} , C^{5+} , Ne^{7+} イオンに関して n_q/n_0 と $j\tau$ の関係を示したものである. He^{2+} , C^{5+} , O^{6+} , Ne^{7+} イオンの生成が可能となる電子ビームのエネルギー $E_{\text{EB}}=1 \text{ keV}$ にて, $j\tau$ を $j\tau=0.9\text{--}1.5(\text{C}/\text{cm}^2)$ の間で調整すると, He^{2+} , C^{5+} , O^{6+} , Ne^{7+} のいずれにおいても n_q/n_0 の最大値を得ることができる. 従って, 条件(ii)のためには, 小型イオン生成装置は $E_{\text{EB}}=1 \text{ keV}$ の場合には $j\tau$

$=1.5 (\text{C}/\text{cm}^2)$ を達成することが必要となる.

本研究の小型イオン生成装置の特徴の一つとして, 電子ビーム形状を中空にすることが挙げられる. これは, 電子銃にて電子の空間電荷効果を緩和しより多くの電子電流を引き出すこと, 及び, 電子ビームの空間電荷効果により生じるイオン源内ドリフトチューブ領域の電位低下を抑制し, EBIS で用いられる細線状電子ビームの場合に比べてより多くの電子をドリフトチューブ内に蓄えることによって, 最大トラップ容量の向上を目指すことが目的である. この中空ビームのイオン源への利用は文献⁷で提案されているが, 今のところ実現されていない. 図 2 に $E_{\text{EB}}=1 \text{ keV}$ での電子ビーム軌道の PIC 法による解析結果を示す. 電子銃の形状を適切に設計することで, 中空の電子ビームの発生を実現できている. この時のドリフトチューブ内電子数は $N_e \sim 10^{11}$ に達し, 上記条件(i)を満たすことが確認された. 図 3 に, この電子ビーム輸送の際の電子電流密度 j の x 軸方向($\perp s$ 軸)分布を示す. この図が示す通り $j \approx 10 \text{ A}/\text{cm}^2$ であるので, 閉じ込め時間は最大で $\tau = 150 \text{ ms}$ に設定する必要がある. これは同系統のイオン源である EBIS では一般的な値であり, 問題なく実現できると想定される. これらの結果から, 条件(ii)も満たされる. 以上の条件により定まった, 電子ビームのエネルギー, 電流密度, 磁場強度は, 近年開発された EBIS⁸ に比べて圧倒的に低い. このような特異なパラメータは, EBIS が元来“重元素多価イオン生成のため”のイオン源であるが故に, これまで検討されてこなかった. 上記の最適化の結果として, 軽イオンの多量生成に特化した, 非常に小型なイオン生成装置が実現できる. また, 磁石は小型の常伝導ソレノイド 1 つのみであり製作のコストは低い.

以上の結果を元に設計された小型イオン生成装置を図 4 に示す. 軸方向磁場を生成するソレノイドのコイルは, 電子ビーム軌道の調整が行える様に, 3 つのパッケージに分けて各々を独立に調整できるようにした. $\tau = 150 \text{ ms}$ の閉じ込め時間を実現するために, 内部には非蒸発型ゲッターポンプ(NEG)を備えて真空度の向上を狙った. 図 5(a)に小型 ECR との比較を示す. 大きさ

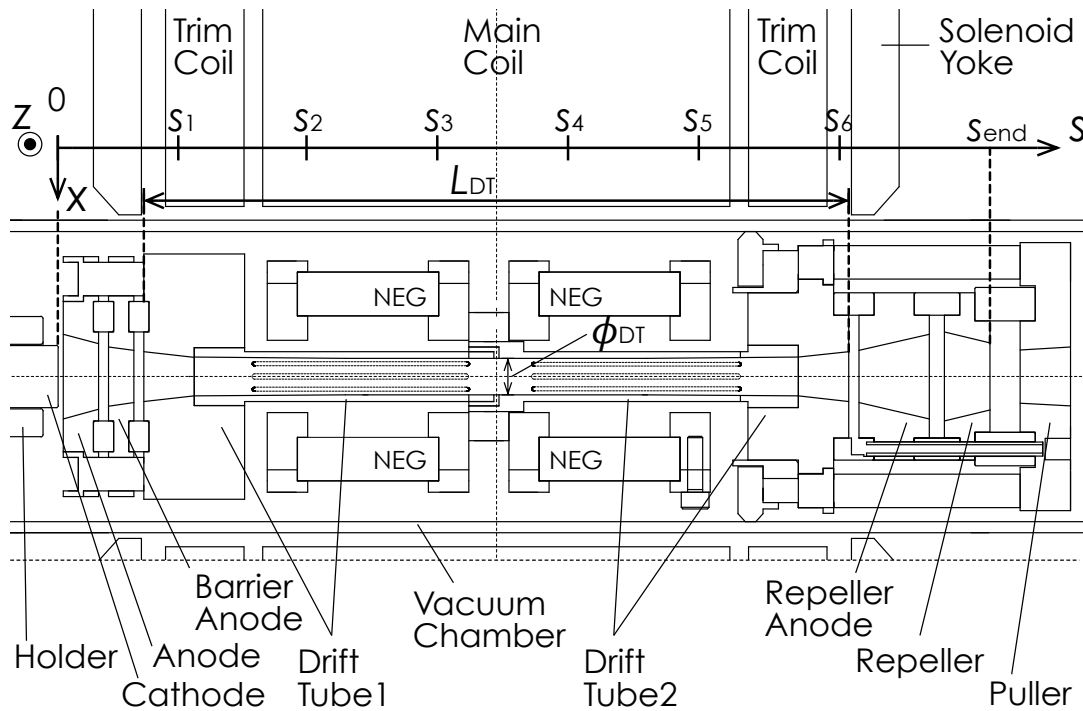


図 4. PIC 解析の結果を元に設計された小型イオン生成装置.⁶

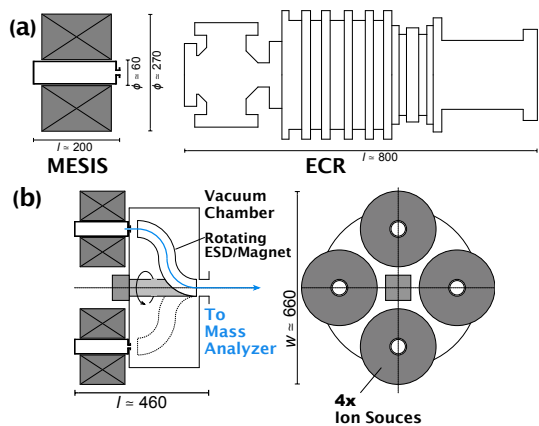


図 5. (a)本研究の小型イオン生成装置(MESIS)と普及型装置用小型 ECR の比較. (b)4つの小型イオン生成装置と偏向器から構成されるマルチイオン生成システム.

は小型 ECR の 1/4 程度に収まり、これを 4 つ組み合わせた小型マルチイオン生成システムは、図 5(b)の示す通り、条件(iii)を満たす小型 ECR 程度の大きさに留まっている. このシステムでは、静電デフレクター(ESD)をシンプルに回転させることによって取り出しイオンの切り替えを 1 秒程度で行うことを想定している.

(2) 小型イオン生成装置による性能評価実験

図 6 に設計・製作後に組み立てをした状態の小型イオン生成装置を示す. 本研究の狙いの通り十分コンパクトに構成することができた. この小型イオン生成装置を用いて、電子ビームの輸送試験、及び 1 価イオン蓄積量の測定試験を行った. 電子ビームの輸送試験⁶では、各電極(陽極、バリア陽極、ドリフトチューブ、リペラーアノード、リペラー)にて損失する電子の量は、実効電子電流の数%であり、概ね PIC 解析にて予測された値と合っていることが示された. 1 価イオン蓄積量の測定試験では、小型イオン生成装置の直下流にファラデーカップを置き、得られる全イオンの 1 価イオン相当量 N_+ を測定した. この測定では、パルス運転での閉じ込め時間 Δt_{conf} を $\Delta t_{\text{conf}} = 1\text{--}100 \mu\text{s}$ まで変えてその依存性を調査した⁶ その結果を図 7 に示す. 各閉じ込め時間 Δt_{conf} での N_+ は 10 回の測定を元に平均値とばらつき($\pm 1\sigma$)を示している. $\Delta t_{\text{conf}} \approx 50 \mu\text{s}$ までは急激に増加するが、 $\Delta t_{\text{conf}} \approx 70 \mu\text{s}$ 以降ではおおそ一定であり、小型イオン生成装置の最大の蓄積量に達していると考えられる. この結果より、1 価イオン換算の蓄積量として、 $N_+ = 1.3 \times 10^9$ 個を得られることが確認された. この値は目標の 10^{11} 個に比べて一桁以上少ない. このイオン数が少ないことの原因の一つとして、ファラデーカップまでの輸送系におけるビームロスが挙げられる. 今回の試験では、小型イオン生成装置の引き出し電極

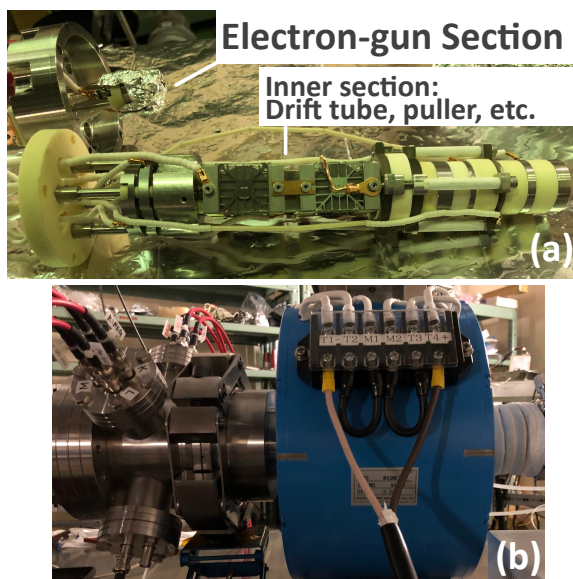


図 6. (a)小型イオン生成装置の内部構造, (b)ソレノイドを含む組み立て後の小型イオン生成装置.

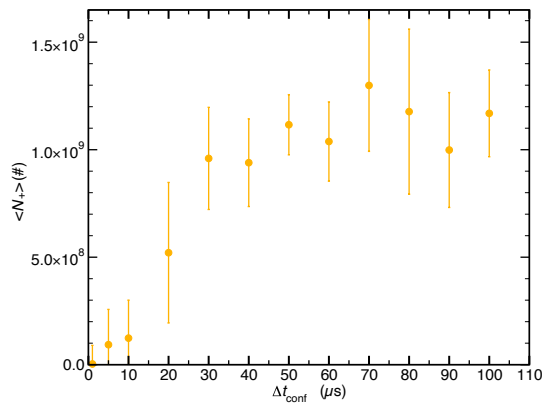


図 7. 小型イオン生成装置より得られる蓄積イオン数 N_{+} (1 価イオン換算) と閉じ込め時間 Δt_{conf} の

ンシヤル場, 及び電極により生じるポテンシヤル場を考慮に入れている. 取り出されたイオンは Einzel レンズ(1st, 2nd, 3rd)によってファラデーカップまでのビームエンベロープを調整できるようになり, 得られる蓄積イオン数 N_{+} の向上を期待できる.

ii. NEG 用電流路に関して

多価イオン生成のために $\tau = 150 \text{ ms}$ の閉じ込め時間を達成するためには, イオン生成装置内の圧力は $P \sim 10^{-8} \text{ Pa}$ 程度まで達成させる必要がある. そのために小型イオン生成装置内部のドリフトチューブ周囲には NEG が設置される. この NEG の動作試験を別の真空チェンバー内で実施したところ, 40 A 弱の加熱電流によりアクティベーションが問題なく行えて, なおかつ圧力が低下する様子が確認されたが, 実機に設置して同様に実施したところゲッター効果を確認することはできなかった. この原因は NEG の治具での熱伝導により熱損失が生じているためと考えられる. これまでにアクティベーションの電流を 60 A 程にまで上げて試験をしているが, 図 9(a)に示す通り, 一部の銅製電流路が蒸発し周囲に付着していることが確認された. 同型の NEG の使用例⁹では, アクティベーションの電流量を 100 A まで試していることから, 本装置においても同様の電流により加熱できるように改良を行った. 図 9(b)に改良後のイオン生成装置の内部を示す. 電流路(Bus bar)の断面積はおおよそ 10 mm^2 まで拡大されており, これにより 100 A 強の電流により NEG を加熱することが可能となる. 今後, 改良後の電流路を用いて NEG による真空試験を実施する予定である.

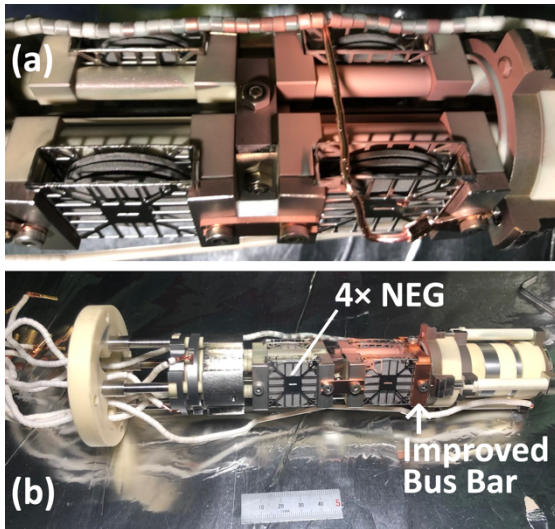


図 9. 小型イオン生成装置内部の NEG 加熱電流路の改造前(a)と改造後(b).

(Puller)から 200 mm 離れたファラデーカップに至るまで, イオンビーム収束用のレンズが設置できておらず, 適切にイオンビームの輸送が適切に行えていない状況であると考えられる.

(3) 実験により生じた問題と改善の方針

i. イオンビーム輸送用の収束系に関して

上記の通り, ビームロスが得られる蓄積イオン数 N_{+} の低減の原因であることが考えられるために, 我々は小型イオン生成装置の下流側に Einzel レンズを設置することを検討した. 図 8 に, 蓄積されているイオンを取り出して輸送した際の各イオンの軌跡を示す. この結果は, イオンに関する PIC 解析を行なったものであり, その際には, 図 2 で示した電子ビームによって作られる閉じ込めポテ

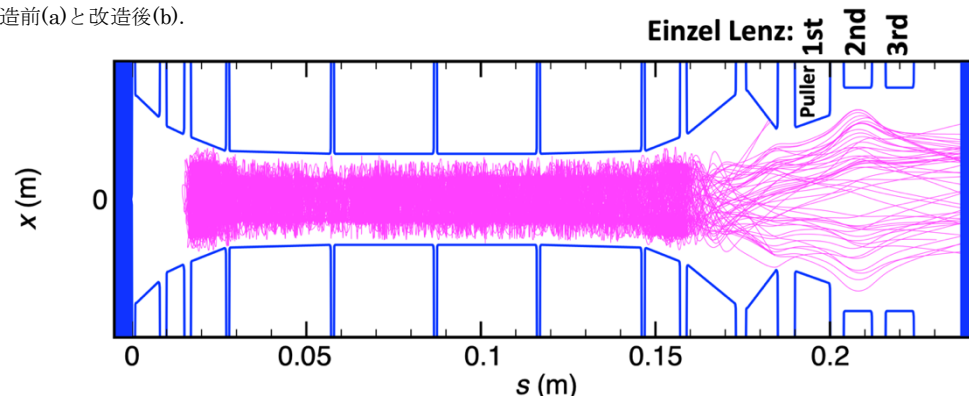


図 8. 輸送系におけるビームロスの低減を狙った Einzel レンズとそれによるイオンビームの収束効果.

¹T. Inaniwa, et al., Phys. Med. Biol. **62**, 5180 (2017).

²T. Furukawa et al., Med. Phys. **37**, 5672 (2010).

³M. Muramatsu et al., Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A328 (2008).

⁴G. Zschornack et al., J. Inst. **5**, C08012 (2010).

⁵K. Katagiri et al., Rev. Sci. Instrum. **89**, 113302 (2018).

⁶K. Katagiri et al., Nucl. Instrum. Meth. A **987**, 164837 (2021).

⁷E.D. Donets et al., Rev. Sci. Instrum. **73**, 696 (2002).

⁸R. Becker et al., Rev.Sci.Instrum.**81**, 02A513 (2010).

⁹S. Kondrashev et al., BNL-211631-2019-COPA (2019).

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 0件）

1 . 著者名 Katagiri Ken, Kawamura Kensei, Wakui Takashi, Muramatsu Masayuki, Hayashizaki Noriyosu	4 . 巻 987
2 . 論文標題 Design study of compact EBIS for light-ion production using low-energy hollow electron beams	5 . 発行年 2021年
3 . 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6 . 最初と最後の頁 164837 ~ 164837
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164837	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0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 イオン源と、それを備えた多種イオン生成装置	発明者 片桐 健, 涌井崇志	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/011145	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------