

東北大 CYRIC における大強度負イオン加速に向けた サイクロトロン加速器入射系のビーム軌道計算 SIMULATION OF THE BEAM TRAJECTORY IN THE CYCLOTRON ACCELERATOR INCIDENT SYSTEM AT CYRIC FOR HIGH POWER NEGATIVE IONS ACCELERATION

服部幸平^{*,A)}, 伊藤正俊^{A)}, 足立智^{A)}, 米倉章平^{A)}, 篠塚勉^{A)}, 今間可奈子^{A)}, 林拓夢^{A)}, 細谷弦生^{A)}, 山崎峻平^{A)},
松田洋平^{B)}, 山崎敦博^{B)}, 福田光宏^{C)}, 神田浩樹^{C)}, 依田哲彦^{C)}, 中尾政夫^{D)}, 倉島俊^{E)}, 宮脇信正^{E)}, 涌井崇志^{F)}

Kohei Hattori^{*,A)}, Masatoshi Itoh^{A)}, Satoshi Adachi^{A)}, Shohei Yonekura^{A)}, Tsutomu Shinozuka^{A)},
Kanako Komma^{A)}, Hiromu Hayashi^{A)}, Genki Hosoya^{A)}, Shumpei Yamazaki^{A)}, Yohei Matsuda^{B)},
Nobuhiro Yamasaki^{B)}, Mitsuhiro Fukuda^{C)}, Hiroki Kanda^{C)}, Tetsuhiko Yorita^{C)}, Masao Nakao^{D)},
Satoshi Kurashima^{E)}, Nobumasa Miyawaki^{E)}, Takashi Wakui^{F)}

^{A)} Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University

^{B)} Konan University

^{C)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

^{D)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{E)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{F)} Institute for Quantum Medical Science, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

We have simulated the beam trajectory of the D^- ion in the CYRIC injection system comparing it with the realistic injection parameters. We discussed how to improve the injection system. The simulation was performed with the IBSimu which used to determine the initial beam distribution, and the code OPAL, which can track particles with 3D space charge, was used for beam transport. The magnetic field of each element in the injection system was calculated using the FEM. The simulated results agreed with the observed beam currents up to $-450 \mu\text{A}$, but the beam diverged at -2.5 mA . We concluded that this was because the space charge compensation was not taken into account in the OPAL-t mode. Improvements of each element of the injection system were clarified with reference to the calculations in agreement with the experiments.

1. はじめに

東北大サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) では大強度の加速器中性子生成に向けて新たに負イオン源を導入した。現在、重水素のエネルギー 25 MeV、引き出しビーム電流値 $100 \mu\text{A}$ 以上という目標に向け、マルチイオン源による多種多様なイオンを加速できる環境を維持しつつ大強度の負重水素イオンを効率よく加速するための研究を行っている。

大強度負重水素イオン加速におけるビーム損失の大きな原因として考えられる空間電荷効果は、エネルギーが低くビーム電流が大きい低エネルギービーム輸送時に強く働く。そのため負イオン源からサイクロトロン加速器までのビームの振る舞いを理解し、入射効率の改善を進める必要がある。本研究では、イオン源におけるビームの初期分布を Ion Beam Simulator (IBSimu) [1] を用いた光学計算で決定し、三次元の空間電荷効果を考慮した軌道計算を Object Oriented Parallel Accelerator Library (OPAL) [2] を用いて行った。本稿では、シミュレーションによる実験値の再現性と CYRIC 低エネルギービーム輸送系の改善策について報告する。

2. イオン光学計算

後述の軌道計算では、ビームの初期分布をガウシアンとして σ_x, σ_{p_x} , 相関係数を用いて定義する。そこでこれらの値を決定するために、IBSimu を用いて負イオン源内部の光学計算を行い、rms エミッタンス ϵ_{rms} を含む Twiss parameters を求めた。プラズマ領域における初期イオンの状態を決定するプラズマパラメータに関してはサンプルコードを参考に条件を変えて計算したなかで軌道計算が実験をよく再現したもの採用した。負イオン源の内部については Fig. 1 のような構造をしており、二つのレンズ系と GND 電極によりイオンが加速され引き出される。Table 1 に計算結果を示す。

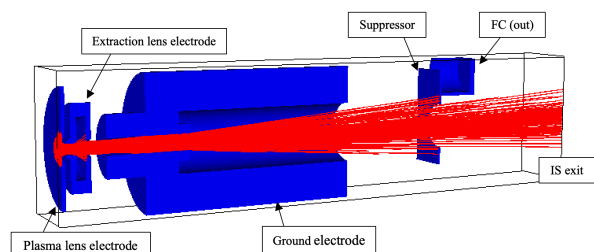


Figure 1: Cross sectional view of 3D optical simulation.

* hattori@cyric.tohoku.ac.jp

Table 1: Optical Simulation Result

Beam current [μA]	$\epsilon_{rms,x}$ [mm mrad]	$\epsilon_{rms,y}$ [mm mrad]
-100	18.6	20.9
-450	27.3	27.1
-2570	36.8	40.0

3. 軌道計算

OPAL を用いて低エネルギービーム輸送系における軌道計算を行った。ビームラインや直線加速器の粒子軌道計算に用いられる OPAL-t では DC ビームを扱うことができないため、今回はバンチ長 1 m のビームを輸送し、さらにバンチの中心 10 cm を解析対象とすることで DC ビームを模擬した。

磁場要素については、CYRIC の負イオン入射系には計 7 つのグレーザーレンズと 90 度偏向磁石、3 対のステアリング電磁石がある。サイクロトロン中心付近ではメインコイルによる磁場の影響を考慮し、ステアリング電磁石は補正用であるため今回は体系に含めなかった。また偏向磁石については OPAL で用意されているデフォルトの磁場を使用した。そのほかのグレーザーレンズとメインコイルについては有限要素法解析ソフト CST studio suite [3] を用いて計算を行った。また、サイクロトロンのビーム強度増強のためのビームバンチャー [4] についても電場計算を行い、テストの条件に合わせてビームをバンチングした。インフレクターについては、OPAL-t では実際のスパイラル状の電極を定義することができないので、インフレクター入口の径に合わせて直径 12 mm の円筒状のコリメータとした。

現状の入射系ではビーム電流（ビーム通過率）のみファラデーカップとインフレクター電極で得ることができるので、今回の軌道計算では通過率に注目して再現性を確認した。ここでシミュレーションにおける通過率はイオン源における粒子数で各位置における粒子数を除算した値とし、実験値についてはビームバンチャーより後ろで測定した通過率を 0.9 で除算した値を軌道計算の比較に用いた。

4. シミュレーション結果

4.1 ビームの通過率

イオン源ファラデーカップの電流値 $-100 \mu\text{A}$ の計算結果を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。OPAL を用いた軌道計算は、ファラデーカップとインフレクターにおけるビームの通過率の測定値と概ね一致した。

次に、イオン源ファラデーカップにおける電流値 -2.57 mA の計算結果と実際の測定値を Fig. 4 に示す。計算結果では輸送初期においてほとんどの粒子が発散するため、実際の輸送と一致しなかった。OPAL-t で空間電荷効果を考慮しない軌道計算も行ったが、Fig. 4 の一点破線で示すように実際の通過率より良い結果となった。これより空間電荷効果を考慮しない計算と空間電荷効果を考慮した計算の中間の計算が実際の輸送を再現すると考えられた。これは OPAL-t で実際の入射系で働く空間電荷補償を考慮していないことが原因だと考えられる。実際の輸送においては、イオン源やビームパイ

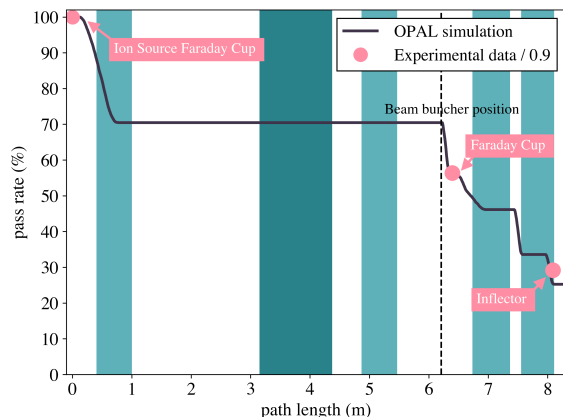


Figure 2: Pass rate of beam along path length and plot processed experimental data ($-100 \mu\text{A}$ at ISFC). The colored background is the area where the magnetic field of 0.1 mT or more exists.

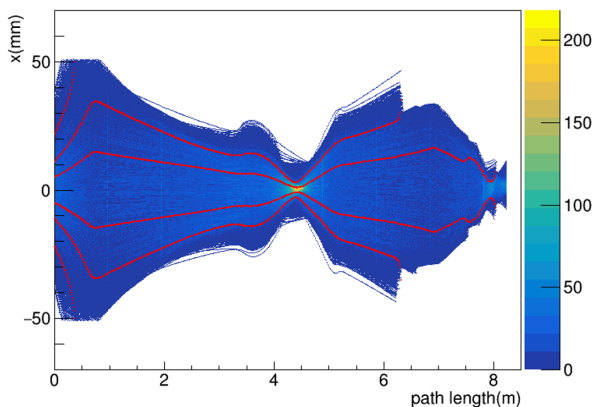


Figure 3: Beam trajectory projection ($-100 \mu\text{A}$ at ISFC). Red lines indicate areas containing 30%, 60% and 90% of the beam from the inner line.

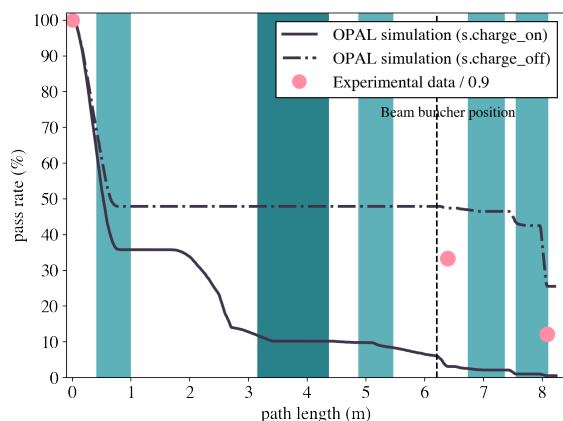


Figure 4: Pass rate of beam along path length and plot processed experimental data (-2.57 mA at ISFC).

ブ内に存在する残留ガスがビームにより電離した際に陽イオンが生じる。この陽イオンが負イオンビームのポテンシャルにトラップされることによりビームの空間電荷効果は緩和される。 $-100 \mu\text{A}$ の場合も空間電荷効果を考慮せずに計算を行ったが、空間電荷効果を考慮した場合の通過率と差がほとんどなかった。空間電荷効果がわずかしか働いていないため、いずれも測定値と良く一致しており、 $-100 \mu\text{A}$ では空間電荷効果が小さいことがわかった。

$-100 \mu\text{A}$ の場合の計算結果から、ビームが大きく失われるのは最初のグレーザーレンズに到達する前の輸送初期とビームバンチャー位置、輸送終盤の磁場が存在する位置であることが分かった。

4.2 グレーザーレンズの励磁電流に対する通過率の変化

前項では、イオン源ファラデーカップにおけるビーム電流値 $-100 \mu\text{A}$ の場合は、OPAL を用いた軌道計算が実際のビームの通過率と良く一致した。Figure 2 では、輸送初期におけるビームロスが顕著であり、最初のグレーザーレンズの位置を最適化する必要があると考えられる。そこで、OPAL でグレーザーレンズの励磁電流を変えた場合のビームの通過率の変化も実際の輸送を再現することを確かめた。実験では最適化したグレーザーレンズを用いて輸送した時の通過率を基準に、通過率が -5% , -10% , ... , -50% まで減る励磁電流を記録した。この励磁電流に対して OPAL で軌道計算、ビームの通過率を調べた結果が Fig. 5 である。グレーザーレンズの定格電流の範囲内で実際の輸送でグレーザーレンズに流す励磁電流を変えた時のビームの通過率の変化も再現することができた。今後は OPAL を用いてグレーザーレンズの位置、励磁電流の最適化を行う予定である。

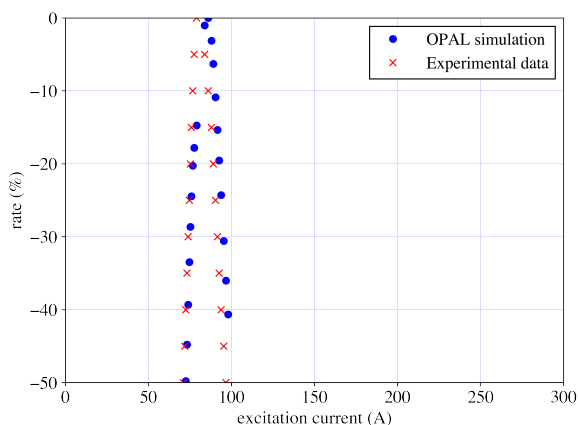


Figure 5: Pass rate of beam along path length and plot of processed experimental data ($-100 \mu\text{A}$ at ISFC).

5. まとめ

大強度負重水素イオン加速の実現に向けて、現状の課題と改善策を検討するために、IBsimu と OPAL を用いてイオン源内部からサイクロトロンインフレクターま

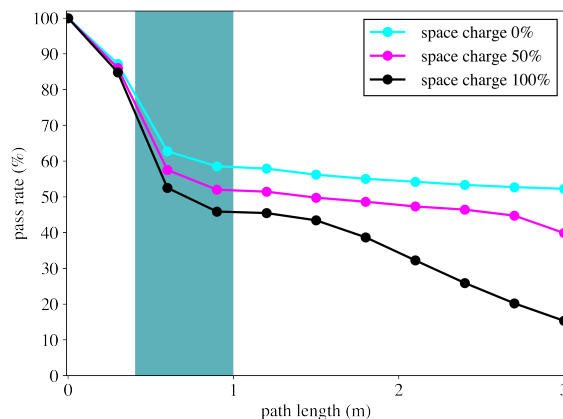


Figure 6: Result of trajectory simulation by adjusting space charge effect using IBSimu (-2.57 mA at ISFC).

でのビーム軌道計算を行った。イオン源ファラデーカップにおける電流値が -2.57 mA では再現に至らなかったが、これは OPAL-t では空間電荷補償が考慮されていないことが原因であると考えられる。一方、 $-450 \mu\text{A}$ までではビーム輸送の通過率がよく一致しているため、今後も OPAL を用いて計算を行っていく。今回検討した課題は、輸送初期におけるビームの発散とビームバンチャーのアーチャーによるロス、偏向後の収束不足である。これらに関しては OPAL を用いて最初のグレーザーレンズの位置の最適化、及びその他のグレーザーレンズの磁場の最適化を行い、通過率を改善する。

また、空間電荷補償についてはガス注入ポートを整備し、CYRIC の輸送系における実証実験を行い、空間電荷を調整した計算 (Fig. 6) と比較することで、ビーム輸送における影響の評価と今後の運用を検討する予定である [5]。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04454 および国立研究開発法人科学技術振興機構産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JST、OPERA、JPMJOP1721) の支援を受けて実施しました。

参考文献

- [1] T. Kalvas *et al.*, "IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics", *Rev. Sci. Instrum.* 81, 02B703, (2010).
- [2] A. Adelman *et al.*, "OPAL a Versatile Tool for Charged Particle Accelerator Simulations", *arXiv e-prints*, p. arXiv:1905.06654, May 2019.
- [3] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [4] 藤田 正広ほか, "東北大学サイクロトロン RI センター 930 型 AVF サイクロトロン の現状", *The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology*, 2003.
- [5] C. A. Valerio Izarraga *et al.*, "Negative ion beam space charge compensation by residual gas", *Physical Review*

Special Topics Accelerators and Beams, 2015.