

高強度小型サイクロトロンの実現に向けた LEBT の研究

NUMERICAL SIMULATION OF LOW ENERGY BEAM TRANSPORTATION FOR A HIGH-POWER COMPACT CYCLOTRON

山崎敦博^{#, A)}, 松田洋平^{A)}, 伊藤正俊^{B)}, 足立智^{B)}, 服部幸平^{B)}, 米倉章平^{B)}, 篠塚勉^{B)}, 福田光宏^{C)},
依田哲彦^{C)}, 神田浩樹^{C)}, 武田佳次朗^{C)}, 原隆文^{C)}, 倉島俊^{D)}, 宮脇信正^{D)}, 涌井崇志^{E)}, 中尾政夫^{F)}
Nobuhiro Yamasaki^{#, A)}, Yohei Matsuda^{A)}, Masatoshi Itoh^{B)}, Satoshi Adachi^{B)}, Kohei Hattori^{B)},
Shohei Yonekura^{B)}, Tsutomu Shinozuka^{B)}, Mitsuhiro Fukuda^{C)}, Tetsuhiko Yorita^{C)}, Hiroki Kanda^{C)},
Keijiro Takeda^{C)}, Takafumi Hara^{C)}, Satoshi Kurashima^{D)}, Nobumasa Miyawaki^{D)},
Takashi Wakui^{E)}, Masao Nakao^{F)}

^{A)} Department of Physics, Konan University

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

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

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

^{E)} National Institute of Radiological, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{F)} Heavy Ion Medical Center, Gunma University

Abstract

In order to stably supply medical RI to the domestic patients, development of a high-power compact cyclotron accelerator is awaiting. However, there are some problems to be solved. One of the problems is the effect of the space charge, especially for beams the energy of which is low. In this study, we have investigated a method and its feasibility to transport the beam. With the simulation tool OPAL, transportation of a H⁻ beam from a negative ion source to a cyclotron in CYRIC was calculated. It was found that a 1mA beam can be injected to the cyclotron by increasing the beam energy. In order to investigate whether such a beam can be extracted from a ion source without the problem of discharge, calculations of the electric field and high-voltage tests in the ion sources placed at RCNP were performed. Based on the calculation, solutions to the problem were discussed.

1. はじめに

核医学検査や核医学療法に用いられる医療用 RI の国内安定供給に向けて高強度の小型サイクロトロン加速器の実現が望まれている。この高強度化で問題となるのが空間電荷効果である。空間電荷効果は低エネルギービームに対して強く働くため、低エネルギービーム輸送系 (LEBT) の輸送効率に影響する。本研究では LEBT の空間電荷効果について検討した。

まず初めに三次元空間電荷効果を考慮したシミュレーションツール OPAL[1]を用い、ビーム電流とエネルギーが LEBT の輸送効率に与える影響について検討した。東北大学ラジオアイソトープセンター (CYRIC) では昨年度大強度負水素・重水素イオン源[2]が導入された。このイオン源は、1mA 以上の負イオンを供給することが可能である。そのようなことから本研究では、今後比較可能な CYRIC の LEBT における負水素イオンの輸送計算を行った。空間電荷効果の問題は、本研究の輸送計算でも示されるが、ビームエネルギーを上げることで緩和される。しかしその実現にはイオン源や中心領域での放電が問題となる。現在、大阪大学核物理研究センター

(RCNP) のイオン源は引き出し電圧を 10 kV 台から 50 kV まで引き上げる改良をおこなっている。そこで本研究では、RCNP にある SCECR[3]と HIPIS[4]について電場計算をもとに放電対策を施し、実際に高圧化できるか試験を行った。

2. 輸送効率の電流依存性

CYRIC の LEBT の概略図を Fig. 1 に示す。イオン源から出たビームは 7 台のソレノイド磁石、1 台の偏向磁石とバンチャーを通過して加速器へと入射される。輸送計算の条件を Table 1 に示す。輸送時のビームエネルギーは陽子 70 MeV 加速時の値と同じである。計算では輸送効率が最も良くなるようにソレノイド磁石の磁場を調整した。計算結果を Fig. 2 に示す。縦軸が輸送効率、横軸がビームの進んだ距離を表している。オレンジ色の部分がソレノイド磁石、紫色の部分が偏向磁石、青色の部分がバンチャーの位置を表している。電流値が大きくなると空間電荷効果の影響を強く受け、加速器への入射効率が下がる。その理由は、7 m 付近と 8.5 m 付近にあるバンチャーとインフレクター径がその他の部分より小さくなっており、空間電荷効果によって広がったビームが削り取られてしまうからである。加速器へ入射可能な最大の電流値は 200 μ A で頭打ちと

[#]m2221001@s.konan-u.ac.jp

なった。バンチャー部分ではビーム電流が小さくなっていることによりビームを空間的に圧縮した際の空間電荷効果の影響は見えにくかった。既存のLEBTは空間電荷効果を考慮して、ソレノイド磁石が配置されているわけではない。イオン源に近い3つのソレノイド磁石の位置を変化させ電流値が2 mAの時の輸送効率が向上するか計算を行った。その結果、初段のソレノイド磁石で輸送効率をわざと落とすことにより最終的な輸送効率は約 2.5 倍になった。しかしビームの広がりをも根本的に解決するものではない。

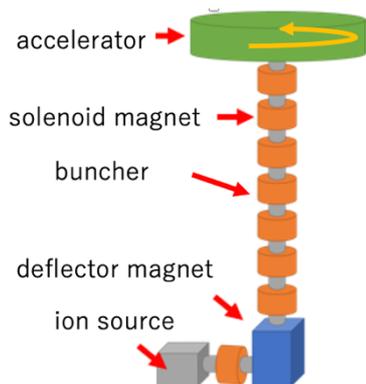


Figure 1: Schematic view of LEBT in CYRIC.

Table 1: Calculation Conditions

Particle	H
Energy	12.4749 keV
Current	1 nA - 10 mA
Emittance	$\epsilon_N=0.1042$ mm mrad
Initial distribution	Gaussian distribution (σ : 6.6687mm, 6.852×10^{-5})
Solenoid	Magnetic field: free parameter
Buncher	The voltage was set to converge the beam at the center of the accelerator.

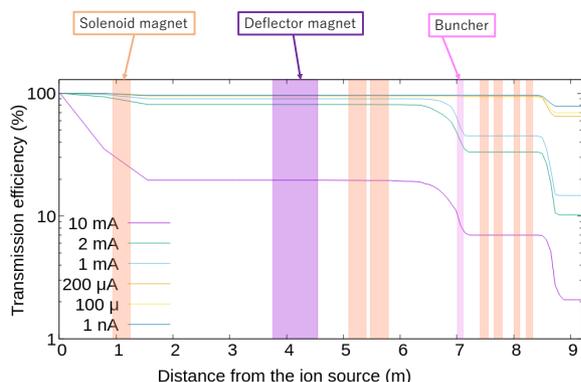


Figure 2: Transmission efficiency of H- beams as a function of the distance from the ion source. The extraction voltage is 12.4749 kV.

3. 輸送効率のエネルギー依存性

空間電荷効果の影響を抑える方法の一つとして、ビームエネルギーを上げることが考えられる。ビームの輸送効率とエネルギー依存性を調べるために、Table 1 と同じ条件で、エネルギーのみ 50 keV に変更して計算を行った結果を Fig. 3 に示す。12.4749 keV の時に比べ全ての電流で輸送効率が向上している。また約 7 m 付近までは輸送効率がほとんど落ちていない。これはビームの速度が大きくなり、空間電荷効果でビームが広がる前にソレノイド磁石までビームが輸送されたからである。輸送効率のエネルギー依存性を確認するために電流値を 10 mA に固定して、エネルギーを 30 keV から 100 keV に変化させて行った計算結果を Fig. 4 にまとめる。エネルギーと入射効率の関係が 50 keV までほとんど線形になっている。またエネルギーが約 35 keV 以上であれば 1 mA のビームを加速器へ入射可能である。

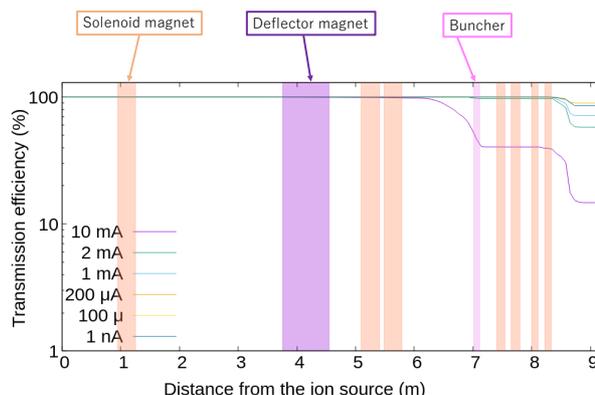


Figure 3: Transmission efficiency of H+ beams. The extraction voltage is 50 kV.

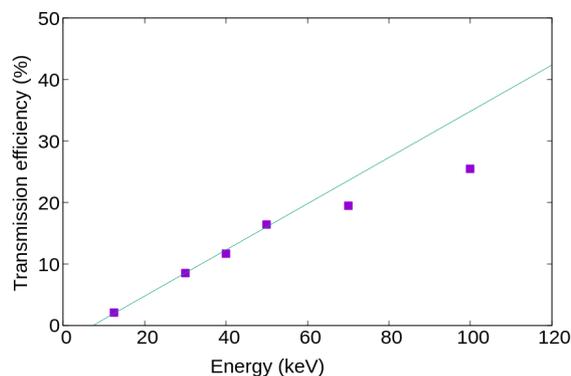


Figure 4: Correlation between the beam energy and the transmission efficiency.

4. イオン源の高圧化における放電対策

空間電荷効果によるビームの広がりを根本的に解消するには高圧化が必要である。しかしその高圧化において、問題となるのが放電である。そこで三次元電磁場計算ソフトを用いて、放電箇所並びに放電対策を推測できるか調べた。大気中の放電を議論す

るために RCNP にある SCECR の六極磁石部分、また真空中での放電を議論するために HIPIS の引き出し電極の電場計算を行なった。そして電場計算をもとに放電対策を施し、実際に高圧化できるか試験を行った。

4.1 SCECR

SCECR の六極磁石部分の断面図を Fig. 5 に示す。特に電場が強くなっていた箇所は丸で囲んだ六極磁石の螺子付近であった。50 kV 印加した時の電場分布を図の右側に示す。実際に高圧試験を行ったところ、六極磁石の螺子付近で放電が起きていることが確認された(Fig. 6)。放電対策としては、電場を弱くする、隙間を埋めて電子の加速領域を短くすることが考えられる。該当箇所が大気中であることとビームが当たって絶縁物の絶縁が悪化することがないため、ネジに金属製の覆いをつけ電場勾配を緩め、高圧と設置電位間を絶縁体で埋めた。これらの放電対策を施した結果、六極磁石に 50 kV を印加することに成功した。

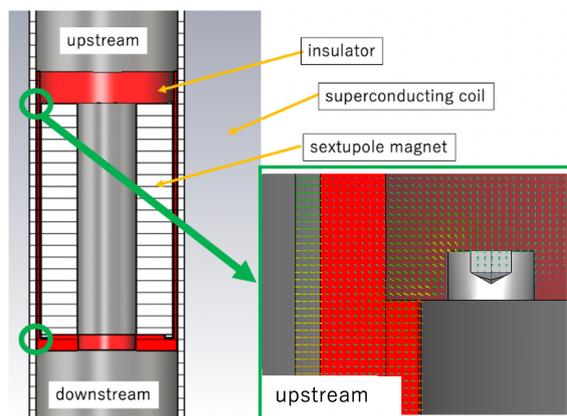


Figure 5: Cross-sectional view of the central region of SCECR where the sextupole magnet is installed. Right side: Electric field around the screw. The supply voltage is 50 kV.



Figure 6: Photograph of the discharge near the screw.

4.2 HIPIS

HIPIS の電極に 50 kV 印加した時の電位を Fig. 7 に示す。丸で囲われている箇所は、電極と接地電位の構造物の間隔が最も狭くなっており、電場が最も強くなっていた。実際に高電圧を印加すると、この辺りで放電が起きた(Fig. 8)。該当箇所の放電対策とし

ては、0.5 torr 以下の真空度の中で電極を ± 2.7 mm の精度で固定すれば 50 kV 印加可能である事が計算から判明した。

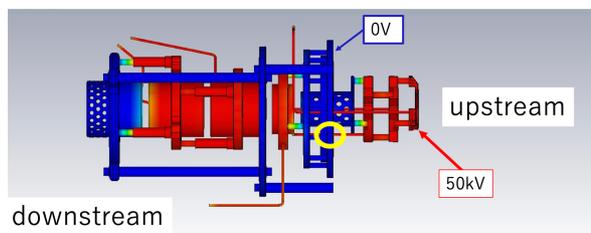


Figure 7: The electrode of HIPIS.

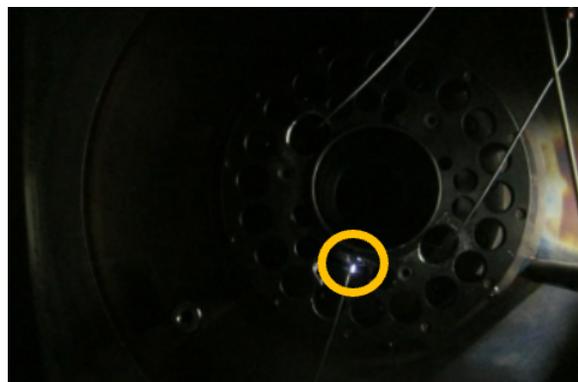


Figure 8: Photograph of discharge near the electrode. The circle indicates the discharge point.

5. まとめ

高強度の小型サイクロトロン加速器の実現に向け、ビーム電流とエネルギーが LEBT の輸送効率に与える影響について検討した。

三次元空間電荷効果を考慮したシミュレーションツール OPAL を用い、東北大学 CYRIC の LEBT に対して負水素イオン輸送計算を行った。輸送時のエネルギーが 10 keV の場合、空間電荷効果により、加速器まで輸送できる電流値は $200 \mu\text{A}$ が限界となった。既存の LEBT において空間電荷効果の影響を根本的に解消するためには、ビームエネルギーを上げることが有効であることが示された。

既存の装置の高圧化に伴う放電について検討するため、三次元電磁場計算ソフトを用いて大阪大学 RCNP のイオン源 (SCECR、HIPIS) の電場計算を行った。電場計算と実際の放電現象を比較することでイオン源、LEBT、中心領域における高圧化の知見を得ることができた。

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] A. Adelman *et al.*, “The OPAL (Object Oriented Parallel Accelerator Library) Framework”, Technical Report PSI-PR-08-02, Paul Scherrer Institute, 2008-2015.
- [2] H. Etoh *et al.*, “Development of High Current Negative Ion Source for Cyclotrons”, SUMITOMO HEVY INDUSTRIES TECHNICAL REVIEW 189 Apr. 2016, 7-9.
- [3] T. Yorita *et al.*, “Development of an 18 GHz superconducting electron cyclotron resonance ion source at RCNP”, Rev. Sci. Instr. 79 (2008) 02A311.
- [4] K. Hatanaka *et al.*, “Performance of the RCNP polarized ion source”, Nucl. Instr. And Meth. A 384 (1997) 575-582.