

大強度負重水素イオン加速に向けた CYRIC930 型 AVF サイクロトロン加速器の軌道計算 SIMULATION OF ACCELERATION IN CYRIC 930 AVF CYCLOTRON FOR HIGH POWER DEUTERON BEAMS FROM D-MINUS IONS

松田洋平^{*A)}、伊藤正俊^{A)}、篠塚勉^{A)}、福田光宏^{B)}、依田哲彦^{B)}、神田浩樹^{B)}、
中尾政夫^{B)}、倉島俊^{C)}、宮脇信正^{C)}、涌井崇志^{D)}

Yohei Matsuda^{*A)}, Masatoshi Itoh^{A)}, Tsutomu Shinozuka^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}, Tetsuhiko Yorhita^{B)}, Hiroki Kanda^{B)},
Masao Nakao^{B)}, Satoshi Kurashima^{C)}, Nobumasa Miyawaki^{C)}, Takashi Wakui^{D)},

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

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

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

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

Abstract

We have investigated the feasibility of acceleration of a negative deuterium beam with a current of 100 μA to an energy of 25 MeV using the AVF cyclotron in cyclotron and radioisotope center and the extraction with a stripping foil. The simulation was performed with the code OPAL which can track particles with three-dimensional space charge. The isochronous magnetic field was calculated with the field map of the AVF cyclotron in Takasaki advanced radiation research institute. The current in the main coil and the position of the stripping foil was determined by searching a reference trajectory. The transmission from the central region to the exit of the cyclotron was surveyed, changing the initial distribution and the current.

1. はじめに

日本国内の放射性同位体 (RI) 供給体制は主に輸入に依存しており、国内に製造拠点となる加速器施設が必要である [1]。特に核医学・薬学の分野では、患者に合わせた治療法を提供するために多種多様な医療用 RI を安定的に供給出来る体制作りが急務となっている。医療用 RI の価格を抑えつつ大量生産するための加速器としては、サイクロトロン加速器が候補として挙げられる。サイクロトロン加速器の特徴は同一加速ギャップにてエネルギーの異なる粒子を同時に加速出来る (小型でエネルギー効率が極めて高い) ことであり、建設費用と運転経費を抑えることが出来る。また RI の製造方法としては、標の上で発熱が少ない、無担体の RI を得やすい、様々な RI が製造可能という点で、加速器中性子を用いた原子核反応が候補の一つとなる [2]。この種の RI 製造用サイクロトロン加速器の仕様を Table 1 に示す。医療用 RI を安定供給するためには、MW 級の軽イオンビームが必要である。従って加速器からビームを効率良く引き出す

必要があることから、負イオン加速と荷電変換による引き出しが採用される。

MW 級小型サイクロトロン加速器を実現するためには、以下の要素技術開発が必要である。

- 数 10–100 mA 級の負イオン源
- 空間電荷効果対策を行った低エネルギービーム輸送系と中心領域
- 省電力化を図った加速空洞
- ビームを効率良く安定的に引き出すことが出来る荷電変換用炭素薄膜

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) では、930 型 AVF サイクロトロン加速器を用いて 2004 年に H^- イオンを加速し、50 MeV、30 μA の陽子ビームの引き出しに成功している [3]。そこで上記の開発を始めるにあたり、まずは当時用いられた機器を改造して、 D^- イオンを加速し、25MeV、100 μA の重陽子ビームを引き出したいと考えている。本稿では、 D^- イオン加速の実現可能性を調査するために行った 930 型 AVF サイクロトロン加速器の軌道計算について報告する。

Table 1: Fundamental Specifications of Cyclotron for RI-Production

Particle	H^- , D^-
Energy	100 A MeV
Current	10 mA
Extraction	Charge exchange

* matsuda@cyric.tohoku.ac.jp

2. 軌道計算

大強度重陽子ビームの実現に向けて、(1) 25 MeV の重陽子ビームの引き出しに適したメインコイル電流の範囲と炭素薄膜の設置範囲、(2) 炭素薄膜と引き出し位置でのビーム形状を確認する必要がある。後者については 100 μA のビーム電流を想定していることから、空間電荷による影響も確認しておく必要がある。そこで今回、PSI で開発された Object Oriented Parallel Accelerator Library

(OPAL) [4] を用いて空間電荷効果も考慮した軌道計算を行った。CYRIC930 型 AVF サイクロトロン加速器の磁場については、 $K \sim 25$ まで測定値が存在する。一方、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所にある同等の AVF サイクロトロンでは $K \sim 100$ までのメディアンプレーンにおける測定値が存在する [5]。本研究では、後者の磁場分布を用い、メディアンプレーン以外の分布は外挿して求めた [6]。

3. H⁻ イオン加速の再現

加速領域の軌道計算の確からしさは、陽子を 25–70 MeV の範囲で加速した際に位相プローブで観測される位相を計算で再現出来ていることで確認した。引き出し部分については、先行研究で行われた H⁻ イオン加速実験との比較から確認した。H⁻ イオン加速を行った際のセットアップを Fig. 1 に示す。ヨーク短軸(長軸)方向を X(Y) 軸とした右手系座標系において、粒子は Z 軸回りに回転する。炭素薄膜並びにメインプローブを取り付けたステムは Y 軸の正の方向から加速器中心に向かって挿入される。Figure 2 に炭素薄膜を取り付けたステム先端の拡大図を示す。ステム先端には Z 軸回りの回転機構が設けられている。回転軸から 250 mm 先に直径 15 mm の炭素薄膜が取り付けられる。炭素薄膜で荷電変換されたビームは Y 軸から 45° の方向にある負イオンビーム引き出し口から取り出される。

先行研究では、陽子 70 MeV 加速相当の磁場で H⁻ イオン加速が行われ、負イオンビーム引き出し口でビーム

強度の測定が行われた。この時、回転軸を X 軸の正の方向に 10° から 15° 回転させることでビーム電流が検出された。また加速器中心から回転軸までの距離を 1000 mm から 1075 mm へと変化させるにつれビーム量が徐々に増加する傾向が見られた。前章で述べた計算コードを用い、炭素薄膜の位置を変えながら H⁻ イオンの軌道計算を行ったところ、これら先行研究の傾向を再現することが出来た。また引き出したビームのエネルギーは 50 MeV 強であり、 $(X, Y) = (86 \text{ mm}, 822 \text{ mm})$ に炭素薄膜を設置した際にビームが引き出し口中心を通過していたことが明らかになった。

4. D⁻ イオン加速

4.1 単一粒子の軌道計算

25 MeV の重陽子ビームを引き出すことが可能なメインコイルの電流値と炭素薄膜設置位置の範囲を求めるために Table 2 に示す範囲で条件を変えながらインフレクター出口から負イオンビーム引き出し位置まで単一粒子の軌道計算を行った。本計算でハーモニックコイルは使用しなかったが、加速位相が $\pm 5^\circ$ に収まるようトリムコイルを用いて磁場を調整した。炭素薄膜の位置は、引き出した重陽子ビームが引き出し位置にあるダクト中心に対して $\pm 10 \text{ mm}$ の幅、 $\pm 2^\circ$ の入射角度に収まることを条件として求めた。この条件を満たす設置範囲は電流値によって大きく変化することなく $x = 55\text{--}100 \text{ mm}$ 、

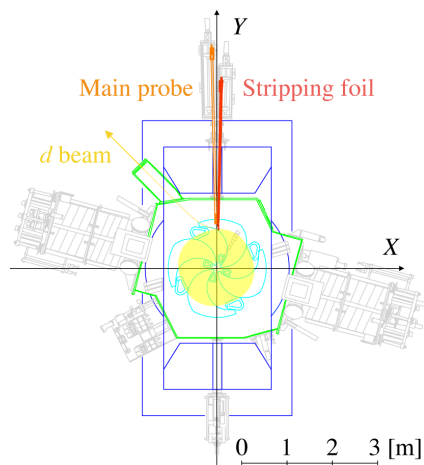


Figure 1: Cross sectional view of the CYRIC 930 AVF cyclotron.

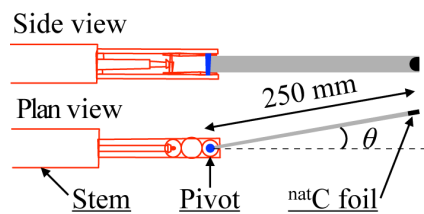


Figure 2: Partially enlarged side and plan views around the stripping foil.

Table 2: Parameter Range for Single-Particle Tracking. Parameters for the 35 MeV deuteron beam are shown in parentheses.

Main coil current	200–800 (538) A
Harmonic number	1–3 (2)
RF Frequency	11–22 (19.6933) MHz
Dee voltage	10–35 (33.18) kV
Initial energy	3–12 (10.23) keV

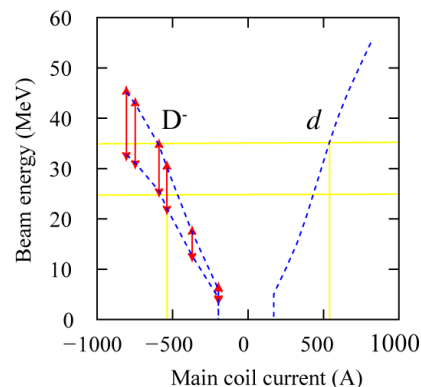


Figure 3: Energy of the extracted deuteron beam as a function of the current in the main coil. Positive and negative currents correspond to the acceleration of deuterons and negative deuterium ions, respectively. For negative deuterium ions, dashed lines indicate the upper and lower limits.

Table 3: Initial Distributions for Multi-Particle Tracking

	Distribution	Standard deviation [mm]	Standard deviation [keV/c]	Correlation coefficient
Lateral direction	Gaussian	0.6–2.6	60–260	-0.8746
Longitudinal direction	Gaussian	0.6–2.6	60–260	0
Vertical direction	Gaussian	0.6–2.6	60–260	0

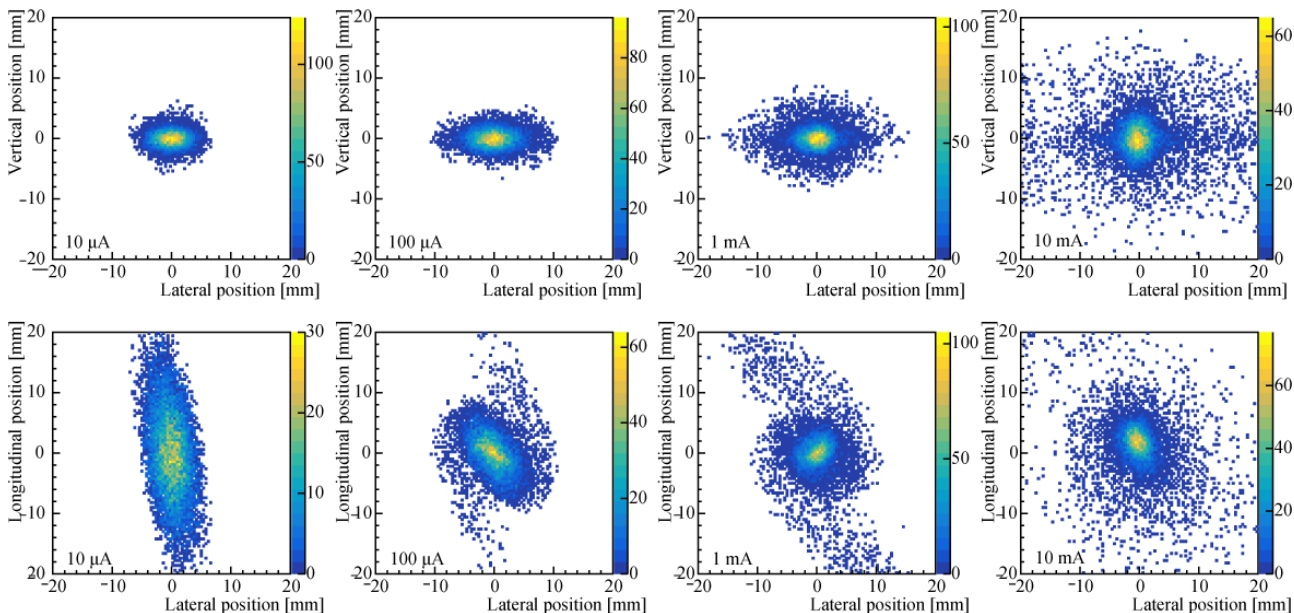


Figure 4: Spatial distributions of beams with currents of $10\ \mu\text{A}$, $100\ \mu\text{A}$, $1\ \text{mA}$, and $10\ \text{mA}$ on the stripping foil.

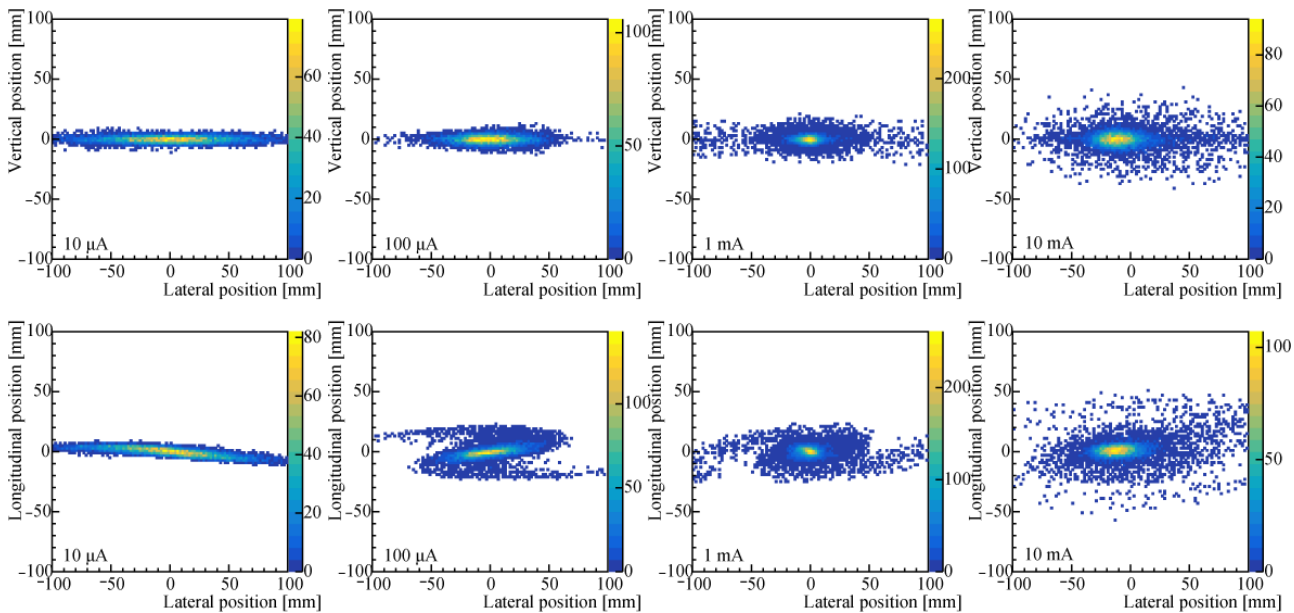


Figure 5: Spatial distributions of beams with currents of $10\ \mu\text{A}$, $100\ \mu\text{A}$, $1\ \text{mA}$, and $10\ \text{mA}$ at the exit of the cyclotron.

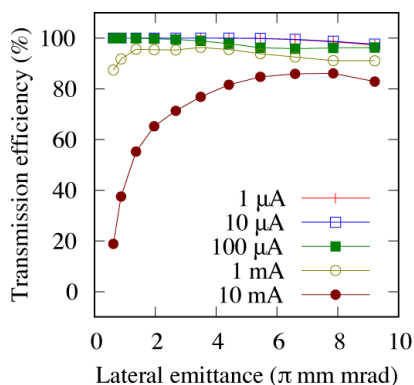


Figure 6: Transmission efficiency from the central region to the effective area of the stripping foil as a function of the lateral emittance.

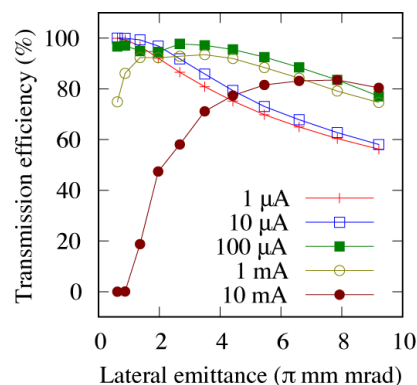


Figure 7: Transmission efficiency from the central region to the exit of the cyclotron as a function of the lateral emittance.

$y = 730\text{--}865$ mm であり、ほぼヒル上にあった。前章で求めた位置もこの範囲にある。メインコイルの電流値毎に引き出し可能なビームエネルギーの範囲を Fig. 3 に示す。正と負の電流値はそれぞれ重陽子加速、 D^- イオン加速に対応している。 D^- イオン加速の場合、点線は引き出せるエネルギーの上限と下限を表しており、引き出し可能なエネルギーの範囲は 4–45 MeV であった。25 MeV の重陽子ビームを得るために必要なメインコイル電流はおよそ 500 A であり、重陽子 35MeV 加速時の電流値に相当する。これは前章の陽子 70 MeV 加速相当の磁場で H^- イオンを加速し 50 MeV 強の陽子ビームを引き出した結果と一致する。

4.2 多粒子の軌道計算

現在想定している炭素薄膜の有感領域と引き出し位置のダクトの口径は、それぞれ直径 15 mm と 100 mm である。前節と同じ等時性と引き出しの条件の元、設定磁場を重陽子 35MeV 加速相当とした場合に 25 MeV のビームがこれらの位置でどのくらい広がるか調べるために、Table 3 に示す初期分布を持つ粒子の軌道をプラー出口から計算した。また空間電荷の影響を確認する為に分布にビーム電流 1 μA –10 mA 相当の電荷を持たせた場合の計算も行った。Figure 4 に初期広がりが 1.8 mm、180 keV/c であった場合のフォイルストリッパー付近での分布を示す。横方向の初期 rms エミッタンスは 4.4 π mm-mrad (twiss パラメータは $\alpha = 1.37$, $\beta = 0.22$) である。10 μA では進行方向にビームが広がり楕円型となっているが、100 μA では空間電荷効果によって渦巻き型になっている [7]。それ以上の電流値ではハロー構造の発達が見られる。Figure 5 に引き出し位置でのビーム分布を示す。フォイルストリッパーを通過したビームの広がりは進行方向から横方向に移り、横長のビームになる。この位置でも高さ方向の広がりはビーム電流によらず十分小さく抑えられており、出口付近では横方向の広がりが問題となる。100 μA の場合、空間電荷効果によって渦巻き型のビームになっている一方、ハロー構造が発達していないため、他の電流値の分布に比べ横方向の広がりが抑えられている。

Figure 6 に加速粒子が炭素薄膜の有感領域を通過した

割合を横方向の初期 rms エミッタンスの関数として示す。空間電荷効果が小さい場合は横方向と高さ方向の広がりは小さく、通過率はほぼ 100% である。電流値が 1 mA を越えると空間電荷効果によるハロー成分が通過率を悪くしている。Figure 7 に引き出し位置のダクトを通過した割合を示す。10 μA 以下では初期分布の形によって通過率が決まり、分布が広がるにつれ通過率は単調に減少する。1 mA 以上では初期分布の広がりが狭いと空間電荷効果が強まりハロー構造が発達してしまうため、最大の通過率を得るには電流値が小さい場合より初期分布を大きくする必要がある。100 μA の場合、他の電流値に比べ横方向の広がりが抑えられているためアクセプタンスは広く、4.4 π mm-mrad のエミッタンスでも 97% 以上の通過率が期待される。

5. まとめ

MW 級小型サイクロトロン of 要素技術開発を始めるにあたり、CYRIC930 型 AVF サイクロトロンにて 25 MeV、100 μA の D^- イオン加速並びにフォイルストリッパーでの引き出しが可能か検討した。PSI で開発された OPAL と高崎量子応用研究所にある AVF サイクロトロンで測定された磁場分布を用いて、 D^- イオンの軌道計算を行い、(1) 25 MeV の重陽子ビーム引き出しに適したメインコイル電流は重陽子 35MeV 加速相当の電流値であること、(2) 炭素薄膜の設置範囲は $x = 55\text{--}100$ mm、 $y = 730\text{--}865$ mm であること、(3) 引き出し位置で 97% 以上の通過率が期待されることを確認した。

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] Japan Atomic Energy Commission, “White Paper on Nuclear Energy 2018”, Sep. 2019; <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index30.htm>

- [2] Y. Nagai *et al.*, “Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons”, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 064201.
- [3] T. Endo *et al.*, “ H^- acceleration with 930 AVF cyclotron at CYRIC, Tohoku Univ.”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Japan, Aug. 4-6, 2004, pp. 680-682; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_lam29/WebPublish/5P86.pdf
- [4] A. Adelman *et al.*, “The OPAL (Object Oriented Parallel Accelerator Library) Framework”, Technical Report PSI-PR-08-02, Paul Scherrer Institut, 2008-2015.
- [5] K. Arakawa *et al.*, “Construction and commissioning of K110 AVF cyclotron”, JAEA-Technology 2008-024, Mar, 2008; <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2008-024.pdf>
- [6] M. M. Gordon and V. Taivassalo, “Nonlinear Effects of Focusing Bars Used in the Extraction Systems of Superconducting Cyclotrons”, IEEE Trans. Nucl. Sci., **32** (1985) 2447.
- [7] J. J. Yang *et al.*, “Beam dynamics in high intensity cyclotrons including neighboring bunch effects: Model, implementation, and application”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **13** (2010) 064201.