

TIARA AVF サイクロトロンの高精度ビームエネルギー制御の検討

STUDY ON HIGH-PRECISION BEAM ENERGY CONTROL FOR THE TIARA AVF CYCLOTRON

宮脇信正^{#,A)}, 渡辺茂樹^{A)}, 柏木啓次^{A)}, 石岡典子^{A)}, 倉島俊^{A)}, 福田光宏^{B)}

Nobumasa Miyawaki^{#,A)}, Shigeki Watanabe^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Noriko S Ishioka^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}

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

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

Abstract

The He beam energy for ^{211}At production was investigated by the beam-energy-and-position monitor under different conditions in the TIARA AVF cyclotron. The energy of a 50 MeV $^4\text{He}^{2+}$ beam was arbitrarily controlled within a range of about 1 % by the cyclotron parameters such as the excitation current of the trim coil and the harmonic coil. We investigated the production rates of ^{211}At and ^{210}At as the beam energy was varied with the cyclotron parameters. The production rates were obtained by the measuring the gamma-ray from the Bi target irradiated with the He beam. Both production rates were confirmed to vary with controlled beam energy.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所では、多様な量子ビームの開発とその利用等に関する研究開発を推進しており、イオン照射研究施設 (TIARA) の AVF サイクロトン ($K=110$) [1] は、材料・バイオ研究等のために 10 MeV H^+ から 490 MeV Os^{30+} の多様なイオンビームを実験に提供している。その中でも、H や He 等の軽イオンビームは、主に RI 製造に利用されている。近年、アルファ線核医学治療に用いる ^{211}At (半減期 7.2 時間) に関する研究が活発になり、TIARA ではサイクロトロンで加速した He ビームを用いてその製造を行っている。 ^{211}At の製造は $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$ の核反応を使用する。この核反応では、Bi ターゲットへの He ビームの入射エネルギーが 30 MeV 程度までエネルギーの増加とともに ^{211}At の収量が増加する [2]。一方、He ビームの Bi への入射エネルギーが 29 MeV を超えると $^{209}\text{Bi}(\alpha, 3n)^{210}\text{At}$ の核反応により、 ^{210}At (半減期 8.1 時間) が生成する。この ^{210}At は ^{211}At との化学的な分離が不可能であり、壊変によって高い毒性の ^{210}Po (半減期 138 日) が生じる。 ^{210}Po の半減期が ^{211}At より長いので、例えば臨床用に製造する薬剤の場合、不純物として残る問題が生じる [3]。従って ^{211}At を多量に製造するためには、入射ビームの強度の増強だけでなく、ビームエネルギーを ^{210}At が生成しない上限近傍に高精度に制御することが必要である。

TIARA AVF サイクロトンでは、加速後のビームエネルギーをリアルタイム測定できるビームエネルギー・位置モニター (BEPM) システム [4, 5] を導入した。これを用いて ^{211}At の製造実験毎に He ビームのエネルギーを測定した結果、最大約 1 % の変動があった [6]。一方、同一実験内のビームエネルギーの変動は約 0.1% 未満と安定であった。これらから、サイクロトンの起動毎に行う Dee 電圧や磁場の調整による影響と推測した。

そこで本研究では、 ^{211}At の効率的な製造を目的とし

て、これらの変動からサイクロトンの調整で使用する Dee 電圧や磁場をビームエネルギーの高精度な制御のパラメータとしての使用について検討を行った。

2. 現状のビームエネルギーと変化の原因

TIARA の RI 製造は、サイクロトン出口から直線上のビームラインの末端に設置された RI 製造装置で実施している。この装置では ^{211}At の製造に固体 Bi ターゲットを使用している。ターゲットの Bi の融点は 271.5°C と低いため、照射中に冷却する必要がある。Bi の照射面と反対側から、ターゲットを固定するための Al 製のフォルダーを水冷して間接的に冷却するとともに、照射面側を He ガスで冷却している。この He ガス領域は Ti 箔で真空と隔てられている [7]。Bi ターゲットに入射する He ビームはこの Ti 箔と He ガスで減速されるため、 ^{211}At 製造の核反応に必要なビームエネルギーより高い約 50 MeV に加速して用いている。

^{211}At の製造実験で用いる 50 MeV の He ビームは、サイクロトンにビームを供給する 4 つのイオン源から、

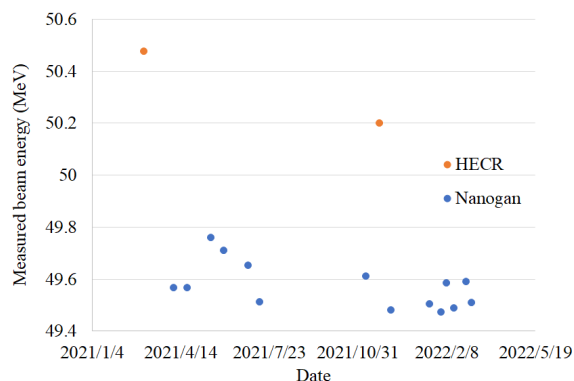


Figure 1: Measured beam energy of each experiment for two ion sources. The extraction voltage of the ion sources and the magnetic field of the cyclotron were the same.

[#] miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

HECR と Nanogan の 2 つを状況に応じて使い分けて供給している。そこで、各イオン源使用時のビームエネルギーを BEPM で測定した。その結果、Fig. 1 に示すように、最大約 1 MeV の差が生じていたことがわかった。一方、2 つのイオン源や低エネルギービーム輸送系、サイクロトロンまでのパラメータに差はほぼ無かった。そこで、エネルギーに最も関係するサイクロトロンに関するパラメータの違いによってエネルギーの差が生じたと考えられることから、ビームエネルギーに寄与する Dee 電圧や磁場を変更して、ビームエネルギーの変化について測定を行った。

3. ビーム測定結果と At の生成率

3.1 Dee 電圧

Dee 電圧を増加した場合、ビームのエネルギー利得が増加するため、サイクロトロン内のビーム軌道が外側に移動し、デフレクター電極などの取り出し機器を通過することができれば、エネルギーが増加したビームを取り出すことができる。Dee 電圧毎のビームエネルギーの測定結果を 2 つのイオン源のそれぞれの場合について Fig. 2 に示す。

両方のイオン源とも Dee 電圧の増加に伴って、ビームエネルギーがほぼ増加する傾向が得られた。ビームエネ

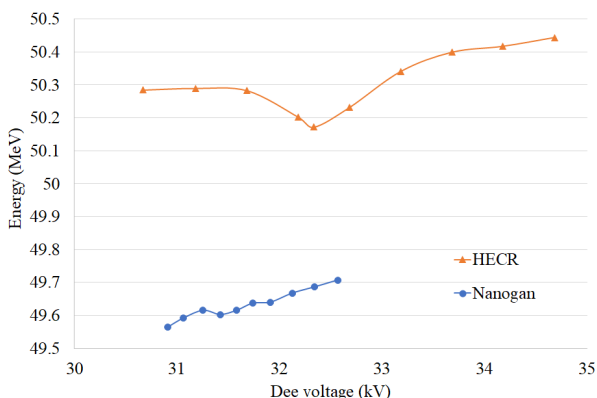


Figure 2: Measured energy of accelerated He beam with each Dee voltage.

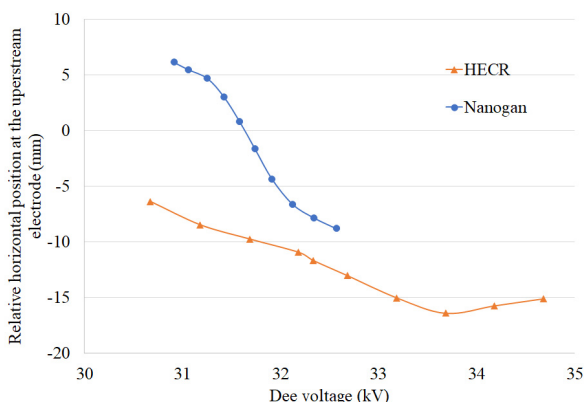


Figure 3: Horizontal beam position for each Dee voltage by the upstream electrode of the BEPM.

ルギーの値は HECR の方が高く、サイクロトロンからビームが取り出せる Dee 電圧の範囲は HECR が 30.6 ~ 34.6 kV と Nanogan の 30.9 ~ 32.6 kV より広い結果となった。一方、ビームエネルギーの変化可能な範囲は両者とも 0.2 MeV 前後と大きくなかった。

取り出し機器を通過するアクセプタンスは小さく、Dee 電圧の変更によってビームは取り出し機器と衝突して損失するため、取り出し後のビーム電流の変化は Fig. 2 のプロット範囲で最大 3 倍以上の差があった。また、Dee 電圧変更時の取出し後のビーム軌道の変化を BEPM の上流側電極で測定した。その結果、Fig. 3 に示すように、Dee 電圧の増加に伴って、負の方向であるサイクロトロンの外周方向側にビーム位置が変化することが明らかになった。また、これによりターゲットへの照射には、ステアリングマグネット等による追加の軌道補正が必要となった。従って、Dee 電圧によって、ビームエネルギーを最大 0.2 MeV を超える範囲で変化させることができるが、ビーム強度や軌道の変化が大きく、Dee 電圧のみでビームエネルギーに大きな差を生じさせることは困難であることがわかった。

3.2 取出し周辺磁場に関するコイルの励磁電流

サイクロトロンからのビーム取り出しのために、一般的に最外周のトリムコイルとハーモニックコイルへの励磁電流を調整する。この励磁電流によって作られる磁場の領域は、最もビームの周回数が多いために磁場の変化に対して敏感に反応する。そこで、これらのコイルの励磁電流に対して取出したビームのエネルギーの変化について調べた。Figure 4 に HECR の条件で最外周のトリムコイルと取出し側の 2 対のハーモニックコイルの片側 (13) の励磁電流毎に測定したビームエネルギーを示す。

トリムコイルの場合、励磁電流が 107 A から 123 A の間で取出したビーム電流が変動する中でその極大値で測定を行った。その結果、ビームエネルギーは約 0.15 MeV の差が生じた。ハーモニックコイルの励磁電流の範囲は、ビームが取り出せる範囲が非常に狭いが、ビームエネルギーは 0.2 MeV 以上変化した。これらより、取出し領域での磁場によるエネルギー変化を確認できたが、ビーム取出しの可否に直接影響し、その調整範囲は狭く、これらのパラメータでビームエネルギーを制御することは困難であった。

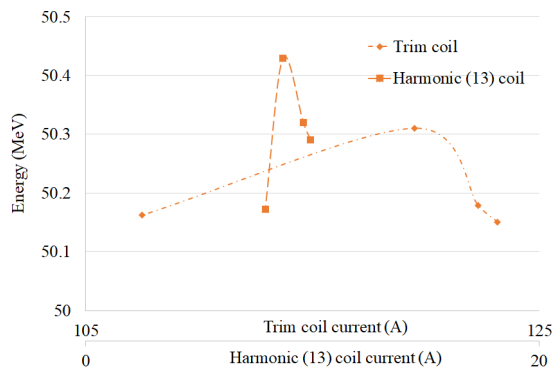


Figure 4: Beam energy for each the excitation current of the trim coil and the harmonic coil near the extraction area.

3.3 入射側ハーモニックコイルの励磁電流

サイクロトン中心付近にある入射側のハーモニックコイルは、周回するビームの軌道中心位置を変えることができる。この軌道の回転中心を取り出し領域から遠ざけるようにハーモニックコイルの磁場を変化させて取出しまでの回転数を増加させることで加速の回数が増加し、最終的にビームエネルギーを増加させることができる。そこで、入射側の2対の片側(24)のハーモニックコイルの励磁電流と取出しビームのエネルギーの関係について Nanogan のビームを用いて調べた。その結果を、Fig. 5 に示す。

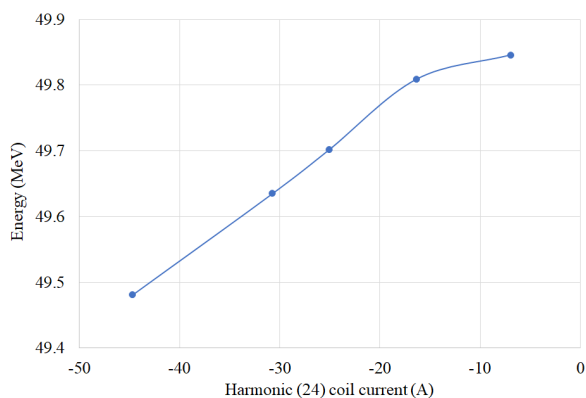


Figure 5: Beam energy for each the excitation current of the harmonic coil near the injection area.

ハーモニックコイルの励磁電流を負から正方向に変化させるとビームエネルギーは約 0.5 MeV の範囲で増加した。この時、取り出し後のビーム電流が減少しないように反対側のハーモニックコイル(13)に流す励磁電流を調整した。これによりビーム電流を変化させずに、幅広い範囲でビームエネルギーの制御ができた。しかしながら、HECR の場合のビームエネルギーまでの増加はできなかった。一方で、ビーム位置はFig. 6に示すように 10 mm の範囲で変化するため、Dee 電圧の場合と同様にビームの軌道補正が必要であることもわかった。

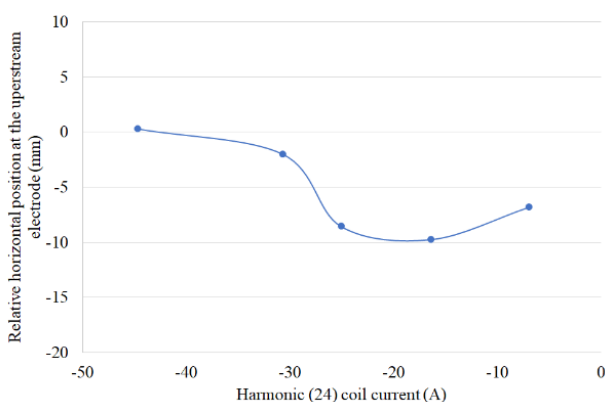


Figure 6: Horizontal beam position for each the excitation current of the harmonic coil near the injection area.

3.4 エネルギー変化に伴う At の生成率

Dee 電圧と入射側のハーモニックコイル(24)の励磁電

流によって He ビームのエネルギーを変化させて Bi ターゲットに照射し、 ^{211}At と ^{210}At の生成率の変化を調べた。照射した Bi ターゲットを Ge 半導体検出器によって核種の同定と定量分析を行った結果を Fig. 7 に示す。

Figure 7 の横軸は BEPM の測定値であり、He ビームのエネルギーは前章で示した通り、Bi ターゲットまでに 0.1 mm の Ti 箔、He ガス層 (1.2 kgf/cm²)、0.39 mm の Al 箔によって、50 MeV から ^{210}At が生成する 29 MeV 近くに低下する。測定した He ビームのエネルギーが 50 MeV より低い領域は、イオン源に Nanogan を用いた結果であり、高い領域は HECR を用いた結果である。エネルギーの増加に伴って ^{211}At の生成率が増加することが確認できる。一方、 ^{210}At の生成率はビームエネルギーが 49.7 MeV 付近を閾値に増加し始め、50 MeV を超えると ^{210}At の生成率の増加の傾きが急になることを確認できる。この結果から、本照射装置における ^{211}At の製造の最適なビームエネルギーは、49.6 MeV であることが分かった。一方で、エネルギー変更に伴うビーム軌道の変化によって Bi ターゲットにおけるビーム位置が変わり、生成率にもばらつきが生じるため、軌道補正を含めたエネルギー制御が必要である。

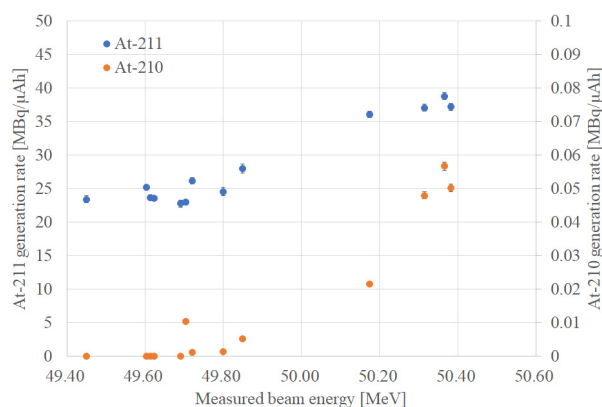


Figure 7: Generation rates of ^{211}At and ^{210}At for each measured beam energy by the BEPM.

4. まとめと今後

TIARA AVF サイクロトンで加速した He ビームのエネルギーを BEPM によって測定し、使用するイオン源毎によってエネルギー差が生じること、Dee 電圧や各種コイル磁場の励磁電流によってビームエネルギーが変化することが確認できた。イオン源の違いによるビームエネルギーの差は最大約 1 MeV であった。Dee 電圧によるビームエネルギーの変更は 0.3 MeV までの範囲で可能であったが、取り出されるビーム電流の減少やビーム軌道の変化を伴った。また、取出し領域の磁場はビームの取出しが可能な範囲が非常に狭く、ビームエネルギーの大きな変更も困難であった。入射側のハーモニックコイルの励磁電流によるビームエネルギーの操作はその範囲が広く、取り出されるビーム電流の変化は小さく、ビーム軌道の変化も Dee 電圧に比べて小さかった。ビームエネルギー制御には入射側のハーモニックコイルの励磁電流の使用が今回の検討においては最適であった。

Dec 電圧と入射側のハーモニックコイル(24)の励磁電流によるビームエネルギーの変化に対する ^{211}At と ^{210}At の生成率の変化を調べた結果、現状の照射装置では49.6 MeV が ^{211}At 製造の最適なビームエネルギーであることがわかった。

今後、イオン源の違いによるビームエネルギーの差の原因追及と更なる最適なビームエネルギー制御のパラメータの探索を行うとともに、 ^{211}At の製造においてエネルギー変更に伴う生成率の変化の最小化に向けた検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP20K08014 の助成を受けて実施しました。BEPM システムの開発全般にわたって理研の渡邊環氏より貴重なご助言を頂き感謝致します。測定システムプログラムに関して日本 NI 株式会社の鴨志田敦史氏より貴重なご助言を頂き感謝致します。

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2, 2017.
- [2] K. Gagnon *et al.*, J. Label Compd. Radiopharm, 2012, 55, pp. 436-440.
- [3] A. Alfarano *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 41, 2006, pp. 115-122.
- [4] T. Watanabe *et al.*, “理研 RIBF におけるビームエネルギー・位置モニターの開発”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1114-1117.
- [5] T. Watanabe *et al.*, “理研超伝導リニアック用ビームエネルギー・位置モニターのコミッショニング”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 718-723.
- [6] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロンにおける RI 製造用ビームラインのビームエネルギー・位置モニターの開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, August 9 - 12, 2021, pp. 302-305.
- [7] S. Watanabe *et al.*, QST Takasaki Annual Report, 2019, pp. 105.