

令和 5 年 6 月 1 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：20K08014

研究課題名（和文）臨床用RI製造のための高精度ビームエネルギー制御技術の開発

研究課題名（英文）Development of high-precision beam energy control technology for clinical RI production

研究代表者

宮脇 信正（Miyawaki, Nobumasa）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・主任研究員

研究者番号：90370478

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、サイクロトロンで加速したヘリウム（He）ビームをビスマス（Bi）ターゲットに照射して製造されるアスタチン（At-211）について、At-210の混入防止とAt-211の収量の最大化を目的として、高精度ビームエネルギー制御技術の開発に関する研究を実施した。ビームエネルギー制御に最適なサイクロトロンのパラメータを見い出してビームエネルギーを連続的に変更できるとともに、そのメカニズムを明らかにし、At-210が生成せずにAt-211の生成率が高い条件で照射できることを実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではサイクロトロンのビームエネルギーを連続的に変更できることを実証するとともに、従来の薄い金属板でエネルギーを減弱する手法に比べて臨機応変に素早くエネルギー変更が可能である事を示した。本成果は、ビームエネルギーに敏感なRIの多量製造に対しての有用性を示すものであり、加速器科学の学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We have conducted research on the development of high-precision beam energy control techniques for astatine (At-211), which is produced by irradiating a bismuth (Bi) target with a helium (He) beam accelerated by a cyclotron, in order to prevent contamination of At-210 and maximize the yield of At-211. The optimum cyclotron parameters for beam energy control were found and the beam energy could be changed continuously, and the mechanism was clarified. It was shown experimentally that the irradiation can be carried out under the condition of high production rate of At-211 without production of At-210.

研究分野：加速器科学

キーワード：アスタチン RI製造 サイクロトロン ビームエネルギー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

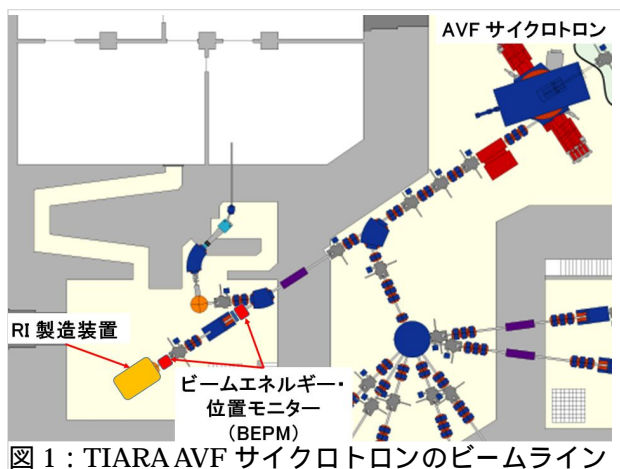
アルファ線核医学治療の候補核種であるアスタチン-211($At-211$)の製造方法として、一般的にサイクロトロンで加速したヘリウム (He) ビームをビスマス (Bi) ターゲットに照射することが実施されている。製造された $At-211$ の半減期は 7.2 時間と短く、臨床に用いるためにはより多量に製造することが求められている。多量製造のためには He ビームの強度を増強する以外に、 He ビームのエネルギーに伴って増加する核反応断面積に従ってビームのエネルギーが調整されている。しかし、 Bi に入射する He ビームのエネルギーが 29MeV を超えると化学的に分離不能な $At-210$ が生成され、8.1 時間の半減期で毒性が高い長寿命 RI である $Po-210$ (半減期 138 日) に壊変して混入する問題がある。 $At-211$ の収量の最大化と $At-210$ 混入の完全防止のためにビームエネルギーの高精度な制御が必要である。一方、サイクロトロンはビームの加速や取り出し方に自由度が高く、取り出されるビームエネルギーはこれまでの測定で最大 1% 程度の変化が認められており、一般的なビームエネルギーの調整である既知の厚さの金属板を使用する方法では素早く微調整することは難しい。そこで、サイクロトロンでビームエネルギーのリアルタイムで直接微調整する制御方法を開発することで、 $At-210$ の生成を完全に防ぎ、 $At-211$ の生成量最大化する照射が可能になるのではないかと、この着想に至った。

2. 研究の目的

$At-211$ の製造で求められる高精度なビームエネルギー制御を可能とするために、サイクロトロンの加速に関するパラメーターを用いた制御方法を開発し、 $At-211$ の製造実験において実証する。

3. 研究の方法

本研究は、図 1 に示す量子科学技術研究開発機構 (QST) 高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 (TIARA) の AVF サイクロトロンとこれに接続する直線ビームライン (LA コース) 及びその末端の RI 製造装置において実施した。RI 製造装置における At 製造では、ターゲットの冷却のために He ガス雰囲気中で照射することから真空窓等によるビームエネルギーの損失を考慮する必要があり、 He ビームを約 50MeV まで加速して用いた。ビームエネルギー測定は LA コース中に設置した 2 つのピックアップ電極からなるビームエネルギー・位置モニター (BEPM) によって、通過するビームの飛行時間差測定から求めた。



(1) サイクロトロンのエネルギー変化の測定

サイクロトロンからのビームを実験毎にエネルギーの変化の有無を確認するため、BEPM を用いてビームエネルギー測定を行った。さらに、BEPM はビームエネルギーをリアルタイムでモニターできることから同一実験内におけるビームエネルギーの変動の有無を確認した。

(2) サイクロトロンのパラメーター毎のビームエネルギー制御

(1) の結果からビームエネルギー制御に最適なサイクロトロンの加速に関するパラメーターとして、加速電圧やサイクロトロンで調整可能な磁場を選択し、これらのパラメーターを変化させた場合のビームエネルギーと位置の変化を BEPM によって測定した。

(3) At 製造実験

ビームエネルギーの変更に対する At の生成率への影響を調べるため、(2) で実施したビームの一部を RI 製造装置に設置した Bi 板に照射して、 At の生成率を求める実験を実施した。照射によって得られた At の生成率を Ge 半導体検出器による線測定から求めた。また、PHITS コードにより、 Bi ターゲット入射時の He ビームのエネルギーについて、BEPM によるエネルギー測定の結果から RI 製造装置中のエネルギー損失を考慮して計算した。

4. 研究成果

(1) サイクロトロンのエネルギー変化の測定

サイクロトロンからのビームエネルギーは、図 2 に示す通り実験毎に変化が確認でき、最大 1% の変化があった。この原因は、サイクロトロンの起動後に加速電圧や磁場等の調整であった。一方、同一実験内でのリアルタイムでビームエネルギーを測定した結果、変動の幅は約 0.1% 未満であった。これは実験日毎の変動よりも十分小さいため、実験中にビームエネルギーの変動がなく、サイクロトロンの起動時のパラメーター設定や調整に原因があることが分かった。

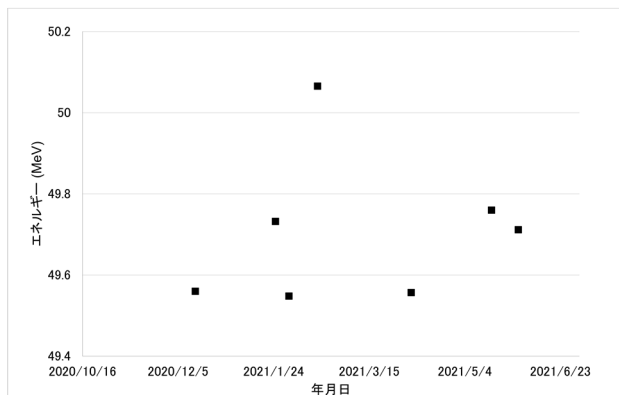


図 2：BEPM で測定した実験毎の He ビームのエネルギーの変化

(2) サイクロトロンのパラメーター毎のビームエネルギー制御

ビームエネルギー制御に最適なパラメーターの条件は、ビーム電流の大幅な減少が無く、幅広いエネルギー範囲にわたって連続的に変更できることである。加速電圧は電圧の増加に伴ってビームエネルギーも約 0.4% 増加したが、サイクロトロンから取り出したビーム軌道の変化が大きく、ビーム電流が大きく増減した。サイクロトロンで調整可能ないくつかの磁場において、周回するビーム軌道の中心を変えるための磁場を生成するハーモニックコイルの励磁電流が、1% 以上のビームエネルギーの範囲で連続的に変更でき、さらに他のパラメーターに比べてビーム電流の変化も他のパラメーターに比べて小さかった。こ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変化は、ビーム軌道の中心の位置変化とビームを取り出すデフレクター電極の相対位置で決まり、高半径側のハーモニックコイルで発生する磁場強度が低半径側より大きく、少ない励磁電流でビームエネルギーを大きく変化できた。これらは、ビームエネルギー制御において実用上重要な成果である。

(3) At 製造実験

At-211 の生成率は、図 3 に示す通り、He ビームのエネルギーの増加に伴って増加することが確認できた。At-210 は 29MeV 付近から検出され、その生成率もエネルギーとともに増加した。しかし、冷却 He ガス圧の変動やビームエネルギーの変更に伴うビーム軌道及び形状変化によるターゲット近傍でのビームの損失によって、測定結果に差が生じた。ビームエネルギーの変更に伴うサイクロトロンからのビーム軌道と形状の制御は、今後の課題である。本成果はサイクロトロンからのビームエネルギーの連続的な変更が可能であることを実証し、ビームエネルギーに敏感な RI 製造に対して有用性を示すとともに、加速器科学においても学術的に意義がある。本成果の今後の展開として、他の RI 製造への応用の検討を行う。

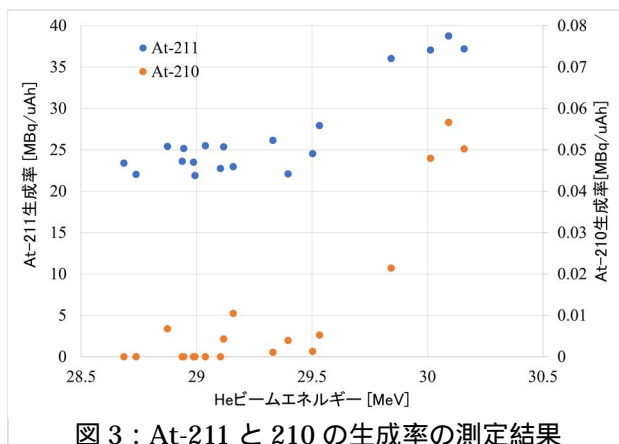


図 3：At-211 と 210 の生成率の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 N. Miyawaki, S. Watanabe, H. Kashiwagi, N. S. Ishioka, S. Kurashima, M. Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental study of beam energy control at the TIARA AVF cyclotron	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Conference on Cyclotrons and their Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 宮脇信正, 渡辺茂樹, 柏木啓次, 石岡典子, 倉島俊, 福田光宏	4. 巻 -
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 889, 892
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Kurashima, S. Watanabe and N. S. Ishioka	4. 巻 QST-M-39
2. 論文標題 Measurement test of beam energy and position monitor system in the beam transport line for RI production	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 QST Takasaki Annual Report 2021	6. 最初と最後の頁 100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 N. Miyawaki, S. Watanabe, H. Kashiwagi, N. S. Ishioka, S. Kurashima, M. Fukuda
2. 発表標題 Experimental study of beam energy control at the TIARA AVF cyclotron
3. 学会等名 23rd International Conference on Cyclotrons and their Applications（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮脇信正, 渡辺茂樹, 柏木啓次, 石岡典子, 倉島俊, 福田光宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮脇信正, 渡辺茂樹, 柏木啓次, 石岡典子, 倉島俊, 福田光宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮脇信正, 渡辺茂樹, 柏木啓次, 石岡典子, 倉島俊
2. 発表標題 ビームエネルギー・位置モニターの導入とビーム測定テスト
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮脇信正, 柏木啓次, 石岡典子, 倉島俊, 福田光宏
2. 発表標題 TIARA AVF サイクロトロンの低エネルギービーム輸送系におけるビーム輸送効率改善の検討
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究 分 担 者	渡辺 茂樹 (Watanabe Shigeki) (10450305)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用 研究所 放射線生物応用研究部・主幹研究員 (82502)	

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
---------	---------