

NIRS-930 サイクロトロンを取り出しエネルギーについて

MEASUREMENT OF BEAM ENERGY AT NIRS-930 CYCLOTRON

北條 悟^{#,A)}, 片桐 健^{A)}, 中尾 政夫^{*A)}, 杉浦 彰則^{A)}, 涌井 崇志^{A)}, 野田 章^{A)}, 野田 耕司^{A)}
Satoru Hojo^{#,A)}, Ken Katagiri^{A)}, Masao Nakao^{*A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Takashi Wakui^{A)}, Akira Noda^{A)}, Koji Noda^{A)}
^{A)} NIRS QST,

Abstract

A NIRS-930 cyclotron (Thomson-CSF, K_b=110 MeV and K_f=90 MeV) has been used for radionuclide production since the first beam in 1973 at the National Institute of Radiological Sciences (QST, NIRS). In recent years, the radionuclide production for Targeted Radionuclide Therapy (TRT) by using the NIRS-930 has been one of the most important activities in NIRS. The beam energy is an important parameter for producing radionuclide, such as ²¹¹At, for TRT. The beam energy was measured by the time-of-flight (TOF) method and was adjusted by changing acceleration frequency.

1. はじめに

放射線医学総合研究所の NIRS-930 サイクロトロン[1] は、放射性同位元素の製造を主目的として、様々な目的で利用されている[2]。放射性同位元素の製造においては、これまで、分子イメージング研究にむけた PET 診断薬等の開発を行ってきた。現在では、その分子イメージング技術を応用し、標的アイソトープ治療 (TRT) に向けた開発も行われている。その一つとして、²⁰⁹Bi ターゲットへの He 照射による ²¹¹At の生成を行っている[3]。²¹¹At の生成にはターゲットに入射する He のエネルギーが重要なパラメータとなっている。入射エネルギーに対しての ²⁰⁹Bi(α,2n)²¹¹At と ²⁰⁹Bi(α,3n)²¹⁰At の反応断面積を Figure 1 に示す。²¹¹At の収量を高くするために、ターゲットの入射エネルギーはピークの 30 MeV にしたいが、ターゲットへの入射エネルギーが 28 MeV を超えると、²¹⁰At が併せて生成されてしまう。²¹⁰At は崩壊すると、放射性毒性の強い ²¹⁰Po となってしまうため、²¹⁰At の生成される量を抑えるようターゲットへの入射エネルギーの目標は 28 MeV となり、その制御が重要となっている。そのため、エネルギーの測定および調整を行った。

2. エネルギーの測定方法

ビームエネルギーの測定には、静電ピックアップのバンチモニターによる TOF 法[5]を用いて行った。NIRS-930 のビームラインレイアウトとバンチモニターの設置位置を Figure 2 に示す。固体ターゲットでの RI 生産照射は、直線照射室を通る C-3、C-4、C-9 コースで行われている。これに対し、バンチモニターは汎用照射室の C-5 コースに設置されている。そのため、各 RI コースのビーム提供後に、別のビームコースである C-5 コースへ切り替えてビーム輸送を行いエネルギーの測定を実施している。

2 つのプロープの間隔は NIRS-930 の最外周長に近い 5771 mm を基準の位置として設置されている。さらに下流側の P2 は ±90 mm の可動範囲を持っており、ビームのピックアップ信号を見ながら移動することができる。

下流側の P2 を移動して、P1 と P2 のピックアップ信号が時間的に重なる位置に調整したときの P1-P2 間の距離が、NIRS-930 の最外周長であり、これより取り出されたビームの平均エネルギーを算出することができる。

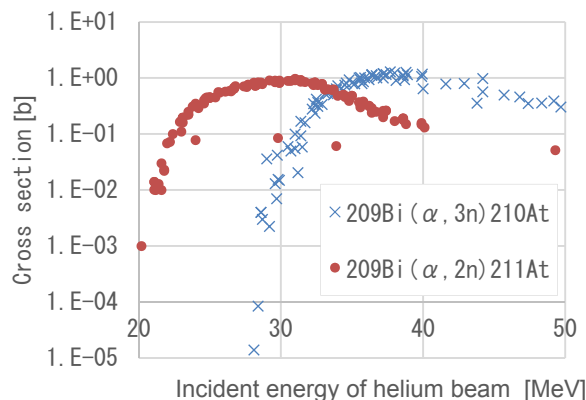


Figure 1: Cross section of ²⁰⁹Bi target with helium beams. Date from EXFOR[4].

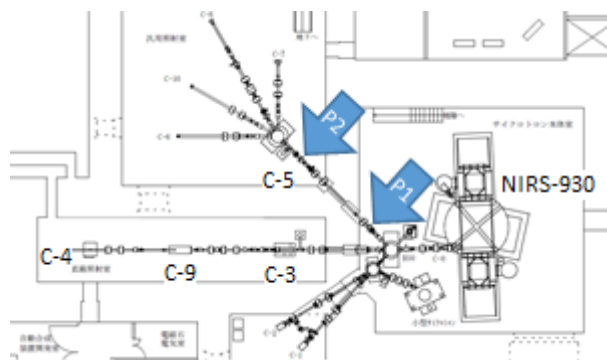


Figure 2: Schematic drawing for beam pick-up probe (P1, P2) arrangement in transport line.

[#] hojo.satoru@qst.go.jp

* Present Address: RCNP, Osaka University

3. 34 MeV He⁺⁺ビーム

3.1 エネルギー調整

ターゲットシステムの構造からエネルギー損失を考慮すると、サイクロトロンから取り出される際の He⁺⁺ のエネルギーは 34 MeV の設定となった。そこで、NIRS-930 サイクロトロンから取り出されるビームのエネルギーの測定を行った。

新しいエネルギーでの加速の際は、エネルギーの公称値と取り出し半径 925 mm から計算ツールを用いて加速周波数を算出し、初期パラメータとして設定しビーム加速を行っている。

34 MeV He⁺⁺ では、13.936 MHz となり、この値を初期パラメータとして加速し、エネルギーの測定を行った。その結果、エネルギーは 35.35 MeV と、4% 近く高い値であった。

この結果をフィードバックして加速周波数を調整し、再度、エネルギーの測定を行った。34 MeV He⁺⁺ の調整後の加速周波数は、13.650 MHz となり、測定した結果は 34.02 MeV であった。He⁺⁺ の周波数に対するエネルギーの測定結果を併せて Figure 3 に示す。加速周波数に対し、エネルギーが直線的に変化しているのが分かる。34 MeV He⁺⁺ の 13.650 MHz においては、提供の際に測定を繰り返しており、日々の測定結果に幅が見えてきている。

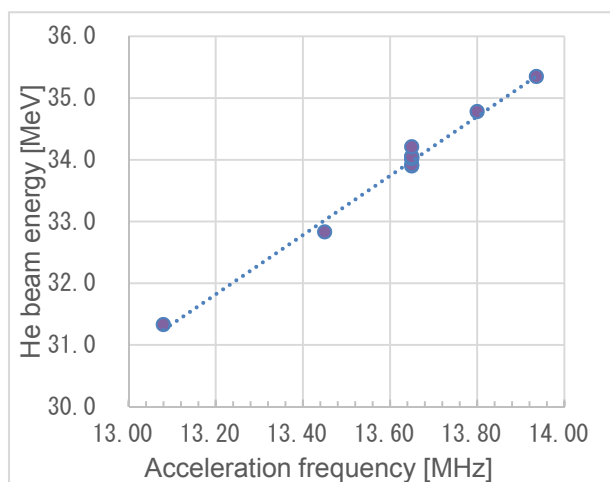


Figure 3: Measured beam energy as a function of acceleration frequency at He beam.

3.2 提供毎のエネルギーの違い

34 MeV He⁺⁺ のビーム提供後に測定したエネルギーの公称値との差を図 4 に示す。

34 MeV に対して、これまでのエネルギー測定結果の平均は、34.02 MeV で概ね ±0.3% の範囲に入っていた。最大のエネルギー差が生じたのは +0.21 MeV があり +0.61% のズレになっている。運転の際の各パラメータに顕著な違いは見られず、今後さらに詳細なパラメータの調査を行ったり、測定回数を増やしたりして、検証していく必要がある。

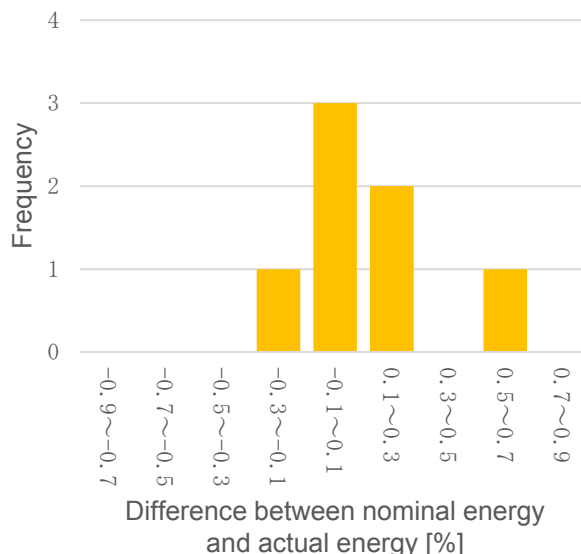


Figure 4: Difference between nominal energy and actual energy at daily operation of 34 MeV helium beam.

4. 初期パラメータ設定の問題改善

他の粒子やエネルギーの測定結果を含め、エネルギー測定後の加速周波数の調整を行ったビームと、加速周波数の調整を行っていないビームの、公称値と実測の差を取り出し半径に対してプロットしたものを Figure 5 示す。調整前では大きいもので 5% 近くエネルギーがずれてしまっているものがあるが、これらは半径が大きくなるにしたがってエネルギーの公称値からのずれが大きくなっていた。初期のパラメータを設定する際の半径の値を 925 mm として計算をしていたため、公称値と実測の差が大きくなってしまっている。さらに、925 mm 付近でも差が出てしまっているため、計算ツールを見直した結果、計算に用いていた定数に誤りがあったことが判明した。そのため、定数を修正し、実測されている半径の平均値を入力することにより計算ツールの改善を行うこととした。

調整後のエネルギー測定の結果については、公称値とのエネルギーの差は 1% 以下に抑えることができています。しかしながら、各測定結果の取り出し半径では 5 mm 以上の違いがみられる。これに対し、各測定時のデフレクタ入口の位置の違いを確認すると最大でも 2.3 mm 程度であり、この差異の要因については今後の検討課題となっている。

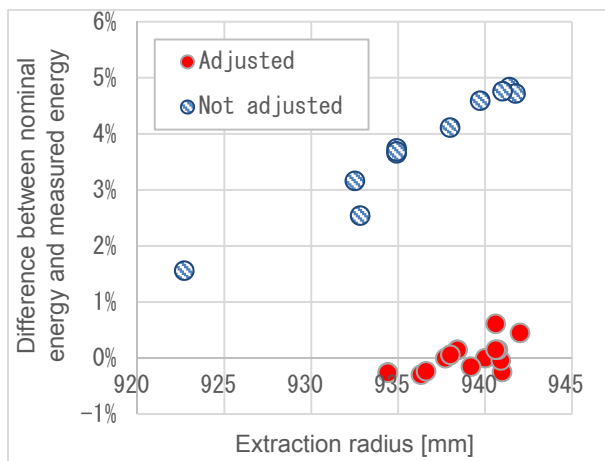


Figure 5: Relation of extraction radius and difference between nominal energy and measured energy.

- [4] EXFOR <http://www.jcprg.org/exfor/> Hokkaido University Nuclear Reaction Data Centre (JCPRG).
- [5] S. Hojo *et al.*, "A beam energy measurement system at NIRS-930 cyclotron" Proc. of the Cyclotrons and their applications 2004 (407).
- [6] T. Watanabe *et al.*, "Development of beam energy measurement system by using electrostatic pickups at the RIBF" Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, 1198-1201 (2015).

5 今後の予定

エネルギーの測定は、毎朝のサイクロトロン立ち上げ後の提供直前に測定し確認するのが最善である。しかしながら、エネルギー測定用のバンチモニターは、固体ターゲット照射の行われる C-3、C-4、C-9 コースではなく、C-5 コースに設置されている。そのため、コース切り替えが必要となりエネルギーの測定をするまでに 20 分程度の時間が掛かってしまう。エネルギー測定に時間が掛かってしまうとビームの提供開始時間が遅れてしまうため、提供終了後にエネルギーの測定を行っての事後確認を余儀なくされている。また、C-5 コースは物理実験が行われる汎用照射室にあるため、エネルギー測定の際には汎用照射室にビームを導入する必要があり、物理実験ユーザーの実験準備等にも弊害が生じている。

また、現在の測定方法では、オシロスコープのカーソル機能を用い測定しているため、測定誤差や読み間違いなどが生じる可能性が危惧される。そのため、他の照射室への弊害もなく、ビーム提供中にリアルタイムでエネルギーのモニターが可能となるように、直線照射室のビームコースへのバンチモニターの導入や、理研の RI ビームファクトリーで用いられているようなリアルタイムの測定システム[6]の導入の検討が必要となってきている。さらに、現在測定できているのは、複数バンチ全体の平均エネルギーのみの測定となっているため、今後、1 バンチに含まれるエネルギー幅の測定についても検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] H. Ogawa *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, No.2 (1978) p1988.
- [2] A.Sugiura *et al.*, "Status Report of NIRS-930 and HM-18 Cyclotron at NIRS" Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, FSP003 (2016).
- [3] K. Nagatsu *et al.*, "Production of ²¹¹At by a vertical beam irradiation method" Applied Radiation and Isotopes 94(2014) 363-371.