

PIXE 専用 AVF サイクロトロンからの中性子発生

藤川 誠¹、石井慶造¹、寺川貴樹¹、松山成男¹、山崎浩道¹、菊池洋平¹、
川村 悠¹、山本竜也¹、世良耕一郎²、佐々木 廣³、前田晃輔³

¹東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻
980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2

²岩手医科大学サイクロトロンセンター
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-58

³佐々木太郎記念 PIXE 分析センター
040-0076 北海道函館市浅野町 5-3

1 はじめに

PIXE 分析は広い研究分野で利用されており、産業利用も広がると考えられ、装置の小型化が望まれる。そこで、陽子を 3MeV に加速する PIXE 専用の AVF サイクロトロンを用いることで装置を小型化し、施設全体をコンパクトにまとめることができた^{1),2)}。

しかしながら、本サイクロトロンはすべて手作りであるため、未だ運転に最適なパラメータが得られず、ビームの取り出し効率が悪い状態であった。そのため、イオン源位置やデフレクター位置等を調整して取り出しビーム量の改善を行った。さらに、運転中に中性子が発生していることが確認された。加速器内部を調べたところ、デフレクター出口付近の磁場補正用の鉄板を押さえるための銅板が放射化 ($0.56 \mu\text{Sv/h}$) していることが確認できた。これは加速した陽子が銅板に衝突しているためであると考えられる。そこで、中性子測定を行い、その結果から中性子の発生源について考察を行った。

2 ビーム調整

2.1 調整方法

サイクロトロンのビーム調整を行うにあたり、調整が可能な機構としてはイオン源の位置および角度、デフレクターセプタムの位置である。イオン源は図 1 に示す青色の五角形内で移動が可能であり、回転軸の異なる 3 つの円 (α, β, γ) を回転させて移動を行う。イオン源の位置はサイクロトロンの中心を原点として、水平方向に X 軸、垂直方向に Y 軸をとって表し、角度 θ は X 軸とのなす角で表す。また、デフレクターセプタムは加速粒子の入口側および出口側の外部からの差し込み量を調節することで位置を決定する。今回は

以下のような手順でイオン源およびデフレクターセプタムを移動させた。

- (1) イオン源をはじめの位置 (X:8.17,Y:7.22, θ :55°) から、引き出し電極から遠ざける方向に移動させてビーム電流が大きくなる位置を求める
- (2) 手順(1)により求めた位置から、引き出し電極と平行にイオン源を移動させてビーム電流が大きくなる位置を求める
- (3) 手順(1)および(2)を数回繰り返して最終的にビーム電流が最大になる位置を求める
- (4) 手順(3)で求めた位置において、イオン源の角度を変化させてビーム電流が最大になる角度を求める
- (5) デフレクターの位置を調整し、ビーム電流が最大になる位置を求める
- (6) 手順(5)の状態でセプタムの位置を調整し、ビーム電流が最大になる位置を求める

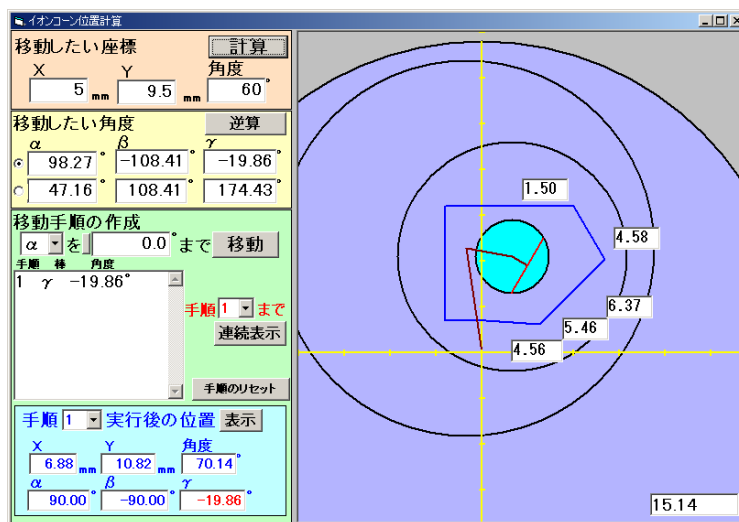


図1 イオン源位置

また、イオン源移動前と移動後の2つの位置において、サイクロトロン内部の2つのプローブ (Aプローブ,Bプローブ) を用いてビームプロファイルを取り、加速粒子の軌道を調べた。Aプローブはデフレクター入り口付近、Bプローブはビームの取り出し口であるマグネティックチャンネルの手前に位置している。

2.2 結果および考察

イオン源位置と取り出しビーム量の関係を図2に示す。球の大きさが取り出しビーム量の大きさを表している。移動前の位置 (X:8.17,Y:7.22, θ :55°) での取り出しビーム電流は約1nAであった。一方、移動後の位置 (X:7.05,Y:8.25, θ :68.45°) では約8nAのビームを取り出すことができた。これはサイクロトロン内部での加速粒子の軌道が変化したためであると考えられる。ビームプロファイルの測定結果および結果から考えられる加速粒子の軌道を図3に示す。粒子の軌道は、AプローブとBプローブの電流値が等しい時には同じ周回の軌道を回っているとして考えたものである。この結果から、イオン源移動前は軌道がAプローブ側に偏っており、イオン源移動後は逆にBプローブ側に偏っていることがわかる。この軌道の偏りはベータatron振動の共鳴により生じたものであると考えられる。そして、ビームの取り出し位置付近 (Bプローブ側) で軌道が集まったときに多くのビームが取り出せたと考えられる。

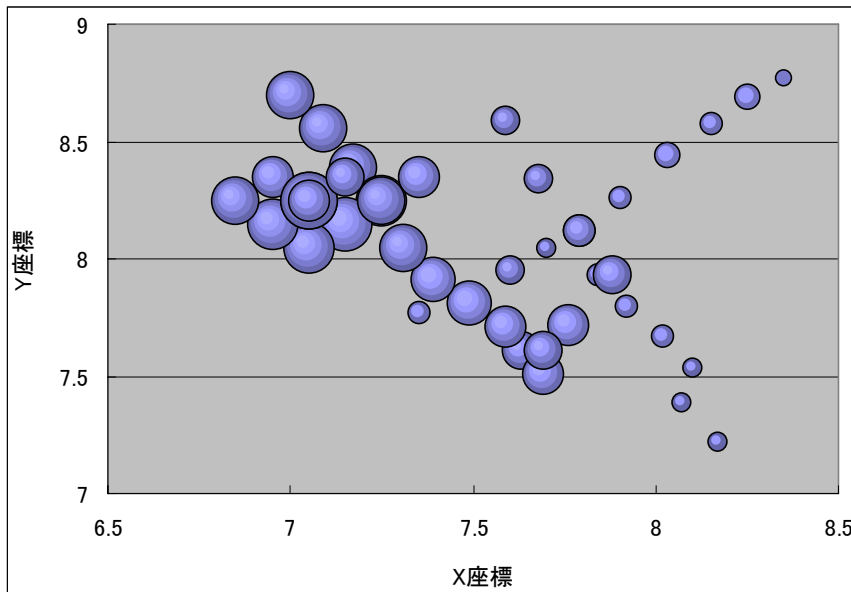


図2 イオン源位置と取り出しビーム量の関係

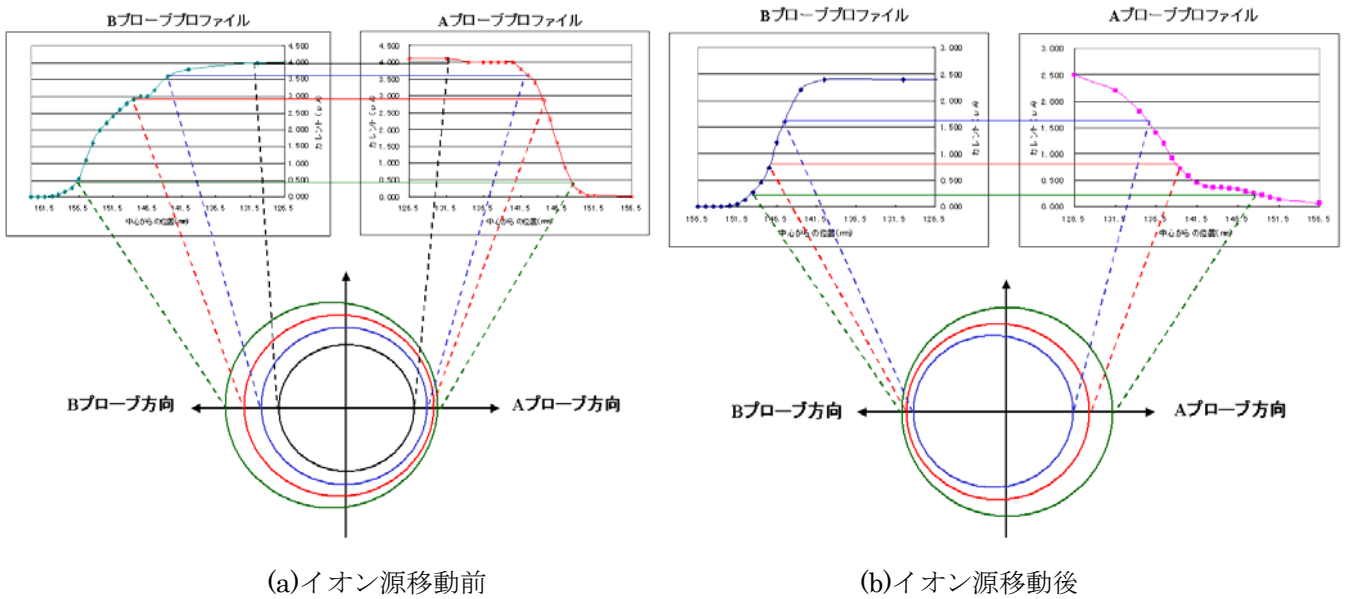


図3 ビームプロファイルおよび加速粒子の軌道

3 中性子測定

3.1 測定方法

中性子の測定を行うために、BF₃ 比例計数管^{[3][4]}と NE-213 シンチレータ^{3),4)}の2つの検出器を用いた。BF₃ は熱中性子を検出することができるので、発生した中性子をポリエチレンブロックで減速した後、加速器周辺の数ヶ所で測定を行い、中性子発生源の位置特定のために用いた。検出器位置を図4に示す。また、NE-213 は高速中性子を検出することができるので、発生した中性子のエネルギーを測定して生じた反応を調べるために使用した。NE-213 はγ線も検出ことができ、²²Na (1.28MeV γ線源) による中性子エネルギーの

校正が研究されている⁵⁾。エネルギー校正はこの方法を用いた。

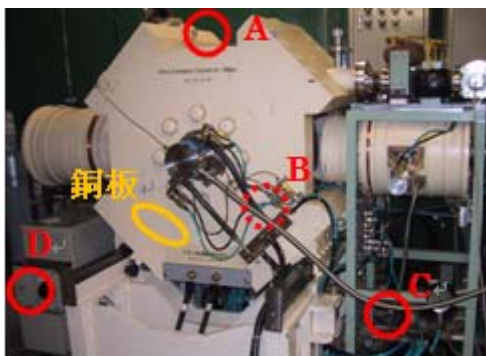


図4 BF₃検出器測定位置



図5 放射化した銅板

3.2 結果および考察

3.2.1 BF₃について

A~Dの各測定点で一定時間(250sec)測定を行い、それぞれ中性子ピークのカウント数を取り、位置Aで規格化を行ったものを表1の中性子量(測定値)に示す。一方、放射化した銅板(図5)の位置から中性子が発生しているとして、鉄の遮蔽と検出器の立体角の影響を考慮して中性子量の相対値を計算したものを表1の中性子量(計算値)に示す。このとき、次式を用いて計算を行った。

$$\phi_0 = \frac{Q(E)}{4\pi r^2} \exp\{-\Sigma_R(E) \cdot r'\} \quad (1)$$

ϕ_0 : 中性子束 $Q(E)$: はじめの中性子束 $\Sigma_R(E)$: 除去断面積
 r : 中性子源から検出器までの距離 r' : 鉄の厚さ

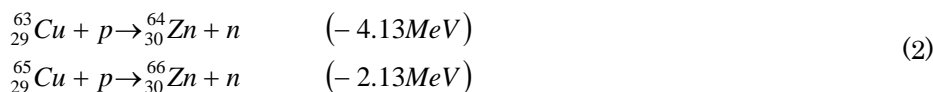
ただし、除去断面積は入射中性子のエネルギーに依存する。今回の計算では中性子のエネルギーを0.5MeVとして計算を行った。これは中性子のエネルギーが最大で0.87MeV程度であると考えられるからである。中性子のエネルギーについては3.2.2節で述べる。中性子量の計算値と測定値を比較するとかなり近い傾向が得られたと言える。したがって、やはり中性子は加速された陽子がデフレクター出口付近の銅に入射したことにより発生したと考えられる。

表1 中性子量の計算結果との比較

測定位置	距離 r[cm]	鉄の厚さ r'[cm]	中性子量(計算値)	中性子量(測定値)
A	40	2	1.000	1.000
B	30	12	0.338	0.211
C	40	15	0.116	0.142
D	50	15	0.074	0.094

3.2.2 NE-213について

まず、3MeVに加速された陽子が銅板に入射したときに生じる反応について考える。銅には⁶³Cuと⁶⁵Cuが69.17:30.83の割合で存在する。それぞれの(p,n)反応およびそのQ値を次式に示す。



よって、3MeVの陽子で起こりうる反応は ${}^{65}\text{Cu}(p,n)$ 反応である。このとき、発生する中性子の最大エネルギーは入射する陽子のエネルギーからQ値を引いた0.87MeVである。

ここで、実際に測定から得られたスペクトルを図6に示す。(a)は ${}^{22}\text{Na}$ から放出される1.28MeVの γ 線を測定したスペクトルであり、(b)は加速器上部の位置Aで測定したスペクトルである。エネルギー校正の結果、(b)のスペクトルがすべて中性子によるものであると考えた場合、その中性子のエネルギーは最大で約10MeVとなる。これは3MeVの陽子では発生しない高いエネルギーのものである。よって、スペクトルの高エネルギー側の部分は中性子ではなく、 γ 線によるものだと考えた。この場合、発生する γ 線のエネルギーは最大で約5.5MeVであり、 ${}^{63}\text{Cu}+p$ と ${}^{64}\text{Zn}$ および ${}^{65}\text{Cu}+p$ と ${}^{66}\text{Zn}$ の静止質量エネルギーの差はそれぞれ7.7MeV、8.9MeVであるから、十分に発生しうるエネルギーである。したがって、加速された陽子が入射した銅板では ${}^{65}\text{Cu}(p,n)$ 反応だけではなく、 ${}^{63}\text{Cu}$ や ${}^{65}\text{Cu}$ に陽子が吸収される反応も生じていたと考えられる。その結果、 ${}^{64}\text{Zn}$ や ${}^{66}\text{Zn}$ の様々な励起状態から基底状態に落ちる過程で γ 線が放出されたと考えられる。

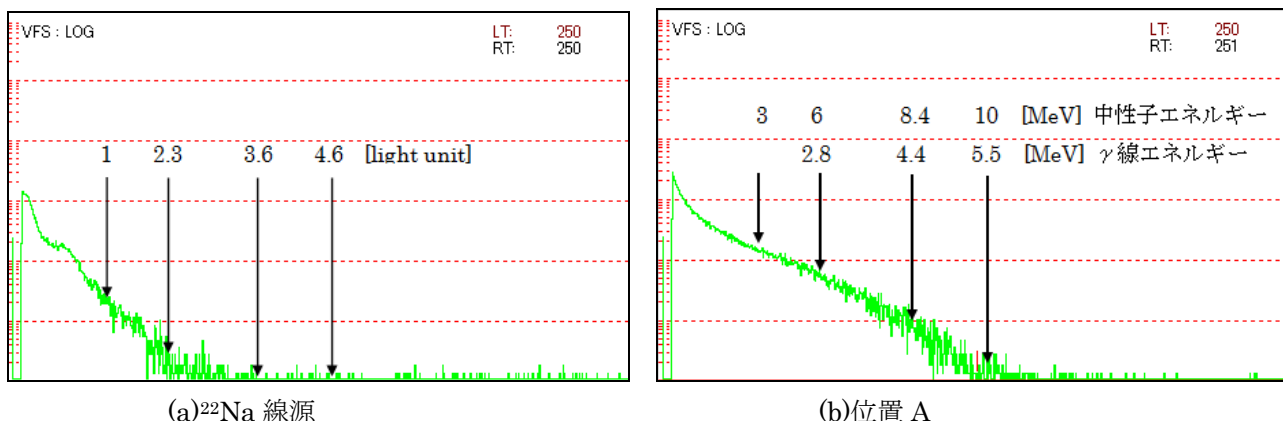


図6 NE-213の測定で得られたスペクトル

4 まとめ

今回、イオン源を移動させてビーム調整を行った結果、以前の約8倍のビームを取り出すことができた。これはベータトロン振動の共鳴により、加速粒子の軌道が偏り、取り出し口であるマグネティックチャンネル付近で軌道が集まったためである。後日、ターゲットまでビームを輸送したところ、3.8nAのビーム電流を得ることができた。これはPIXE分析を行うことのできるビーム量であるので、本サイクロトロンを今後PIXE分析に利用して研究を行う予定である。

また、中性子はデフレクター出口付近の銅板に加速された陽子が入射して ${}^{65}\text{Cu}(p,n)$ 反応が生じていたことが原因であった。中性子の発生を防ぐために銅板を厚さ1mmのTa板で覆い、線量を調べたが前後で有意な差は認められなかった。サイクロトロン内には銅や真鍮で作られた部品が多いため、別の場所からも中性子が発生しているのではないかと考えられる。中性子は加速粒子がサイクロトロン内に衝突して発生しているので、ビームの取り出し効率の向上にも大きく関係するため、今後も研究を続けていきたいと考えている。また、測定された線量(0.90 μ Sv/h)はターゲット電流が数nAの状態での測定を行うことには問題のない値なので、PIXE分析に利用することは可能である。

参考文献

- 1) S.Wakasa et al., Int., J. PIXE 3 (1993) 329.
- 2) A. Terakawa et al., The proceedings of XI International Conference on PIXE and its Analytical Applications (Puebla, Mexico), PII-3 (2007).
- 3) グレン F・ノル (木村逸郎、阪井英次 訳) 放射線計測ハンドブック、日刊工業新聞社
- 4) コラス・ツルファニディス (阪井英次 訳) 放射線計測の理論と演習、現代工学社
- 5) V.V.VERBINSKI et al, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 65 (1968) 8-25.

PIXE cyclotron

M. Fujikawa¹, K. Ishii¹, H. Yamazaki¹, S. Matsuyama¹, A. Terakawa¹, Y. Kikuchi¹, M. Fujiwara¹,
K. Sera², H. Sasaki³, K. Maeda³, Y. Kawamura¹ and T. Yamamoto¹

¹Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University
6-6-01-2 Aramaki-zaaoba, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

²Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

³Sasaki Taro Memorial PIXE Center
5-3 Asanotyou, Hakodate, Hokkaido 040-0076, Japan

Abstract

PIXE analysis plays an important role in various fields of research such as biology, biomedical sciences, environmental sciences, archeology, and material sciences. We have performed PIXE analysis at the Sasaki Taro memorial PIXE center in Hakodate, Japan where a 3-MeV AVF cyclotron and two beam lines for horizontal and vertical irradiations have been installed. The center has not been able to offer PIXE analysis in recent years because of cyclotron troubles and the cyclotron was repaired recently.

In order to optimize acceleration variations, we measured beam profiles with internal probes and investigated in beam intensity for various parameters concerning RF system as well as internal ion source and deflector. As a result, we succeeded to transport proton beams of about 3.8 on the target, that is sufficient for the conventional PIXE analysis. We were recognized that the betatron resonance plays an important roll for the beam extraction.

A significant number of neutrons from the cyclotron due to the $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$ reaction were observed during the operation, indicating the main source of the beam loss in the cyclotron.

In this symposium we will report details of the present status of PIXE facilities and the above cyclotron at the Sasaki Taro memorial PIXE center.