

Measurement of the beam energy spread at the JAEA AVF cyclotron

Susumu Okumura¹, Satoshi Kurashima, Nobumasa Miyawaki, Hirotsugu Kashiwagi, Ken-ichi Yoshida, Ikuo Ishibori, Yosuke Yuri, Takayuki Nara, Takashi Agematsu
Japan Atomic Energy Research Institute
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

Abstract

The energy spread of the beam extracted from the JAEA AVF cyclotron was measured with a simple analyzing system, including the existing deflecting magnet system in the transport line. A test was conducted to prove the analyzing system by comparing energies measured with a semiconductor detector. The beam energy spread for single-turn extraction was measured and was half of the one for multi-turn extraction.

原子力機構AVFサイクロトロンビームのエネルギー幅計測

1. はじめに

原子力機構AVFサイクロトロンでは、4連四重極レンズを用いたビーム集束方式によって、数百MeV級重イオンマイクロビーム形成を目指している^[1]。レンズでの色収差の影響を抑制して1 μm 以下のビーム径及び照準位置精度を達成するためにはビームエネルギー幅を従来の0.1%程度から0.02%へ縮小化が必要がある。そこで、フラットトップ加速^[2]などを用いたエネルギー幅縮小化を進めている。フラットトップ加速では、基本波加速電圧に第五高調波を加えて加速電圧を平坦化するが、ビーム位相をこの平坦化領域に制限する必要があり、サイクロトロン中心領域の2組のビーム位相スリットでビーム位相を制御するとともにビームバンチャーでビーム強度を増強している。一方、磁場変動によるビーム位相変化を抑制するために、サイクロトロン電磁石の鉄心温度安定化を実施し、許容磁場変動率 $B/B = \pm 1 \times 10^{-5}$ 以内をすでに達成している^[3]。本AVFサイクロトロンでは、従来はビーム引き出し直前の半径方向のビーム分布が連続分布(マルチターン)であったが、上記のエネルギー幅縮小化によってターンの分かれた分布(シングルターン)を実現した^[4]。ビームエネルギー幅縮小化を確認するために、ビーム輸送系に設置されている分析電磁石を用いた計測システムを開発した。本報告では、本計測システムの性能評価、およびシングルターン引き出しビームのエネルギー幅計測結果について述べる。

2. エネルギー幅計測システム

2.1 ビーム輸送光学系

図1にサイクロトロン出口下流のビーム輸送系を示す。サイクロトロンから出たビームは、三連四極電磁石による集束を受け、最初の集束点CS0へ輸送され、次に四連四極電磁石によって集束点TS1へと

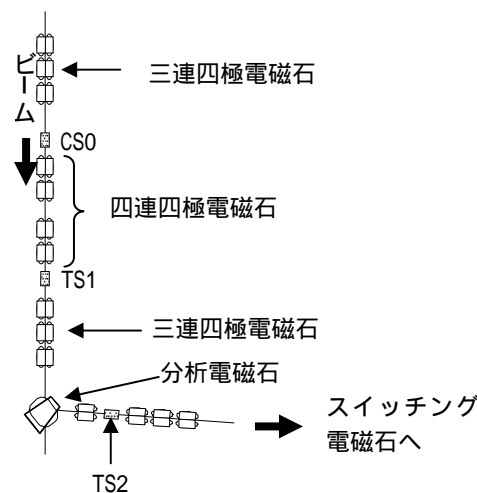


図1：サイクロトロン出口下流のビーム輸送系

輸送される。軽イオン大電流照射のために設けられた直線輸送コースを除いて、ビームは三連四極電磁石、80度偏向の分析電磁石、四極電磁石から構成される分析電磁石系によって集束点TS2へ輸送され、その下流のスイッチング電磁石で各照射室へと分配される。ビーム強度などのビーム特性は各集束点に設置されたビーム診断ステーションでモニタしている。TS1からTS2の分析電磁石系でエネルギー分析を行い、NMR磁場測定装置で得た分析電磁石の磁場の値から、ビームエネルギーを算出している。ただし、絶対値較正は、飛行時間法によるエネルギー計測を末端の実験ポートで実施している^[5]。

2.2 計測原理

ビームエネルギー幅計測では、分析電磁石系での運動量分散によるビームの拡がりを利用して、分析電磁系の運動量分解能を評価するために、以下の第一次近似の表式を用いた^[6]。

¹ E-mail: okumura.susumu@jaea.go.jp

$$S_i = M \cdot S_o \quad (1)$$

$$R = D / S_i \quad (2)$$

So: オブジェクトのスリット幅
Si: イメージのスリット幅
M: オブジェクトからイメージへの拡大率
R: 運動量分解能(P/P)
D: 分散

運動量高分解能化を進めるためには微小なスリット幅が必要となるため、スリット端面での散乱が問題となる。そこで、マイクロビーム形成に用いられている円柱形ロッドを用いたマイクロスリットを開発し、ビームエネルギー幅計測システムを構築した。オブジェクト位置TS1からイメージ位置TS2の分析電磁石系の分散Dと拡大率Mを計算コードTRANSPORTで求めたところ、 $D = 2\text{mm}/(1 \times 10^{-3})$ 、 $M = -1$ であった。今回使用したオブジェクトおよびイメージスリット幅は共に $100 \mu\text{m}$ であるため、エネルギー分解能は、式(1)、(2)および $E/E=2 P/P$ の関係より $E/E = 1 \times 10^{-4}$ である。

2.3 システム構成

本計測システムは、オブジェクト位置TS1用マイクロスリット (TS1マイクロスリット) およびイメージ位置TS2用のマイクロスリット (TS2マイクロスリット)、マイクロスリットを通過したイオンを検出する半導体検出器およびその検出信号処理系、マイクロスリット駆動制御系で構成されている (図2)。TS1マイクロスリットのスリット幅に対するイメージサイズの拡がりを求めるために、TS2マイクロスリットを走査しながらTS2各位置での検出イオンカウント数を記録する。計測・駆動制御プログラムにはLabVIEW(National Instruments製)を用い、PCと機器との接続にはGPIBを使用している。サイクロトロン本体室に設置しているのは、マイクロスリット駆動用モーターコントローラ(PMC-6GR: 神津精機製)と半導体検出器用プリアンプで、その他は制御室に設置している。モーターコントローラの遠隔通信には、イーサネット経由で容易にGPIB接続が可能なGPIB-ENET/100(National Instruments製)を使用している。

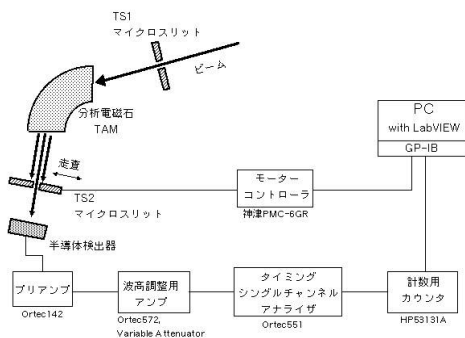


図2: ビームエネルギー幅計測システム概略図

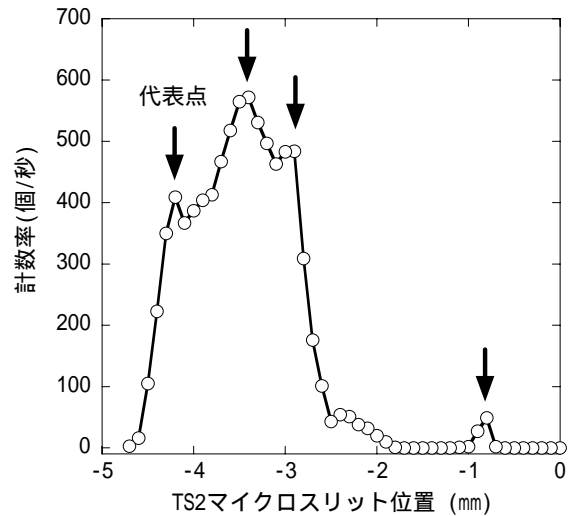


図3: TS2でのビーム強度分布

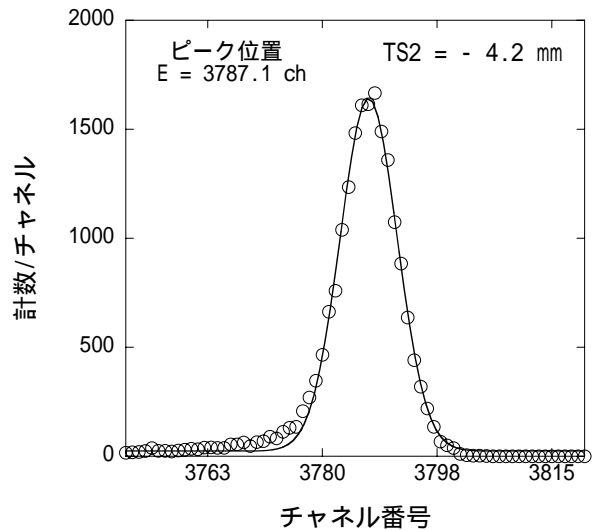


図4: 半導体検出器のエネルギースペクトル

3. 計測システムの性能評価

分析電磁石系で設計通りにビーム輸送が行われ、計測システムで予定通りの性能が出ているかを確認するために、半導体検出器で計測したビームエネルギー (相対値) を用いた性能評価を実施した。図3は、位置を固定したTS1マイクロスリットを通過したビームについて、TS2マイクロスリットを走査して計測したTS2でのビーム強度分布で、ビームエネルギーの広がりを表している。領域全体を網羅するようにこの分布から代表点を選び、そのTS2マイクロスリット位置について、半導体検出器でエネルギースペクトル計測を実施した。図4はTS2マイクロスリット位置-4.2mmでの半導体検出器のエネルギースペクトルで、ピーク位置は3787.1chであった。このピーク位置 E_0 を基準として、各ピーク位置の偏差の割合 $E/E = (E - E_0) / E_0$ とTS2マイクロスリット位置Xとの関係を図5に示す。直線フィッ

ティングより傾き $(E/E)/X = 1.1 \times 10^{-3}/\text{mm}$ が得られ、これは分散Dより求めた理論値 $1.0 \times 10^{-3}/\text{mm}$ にほぼ一致している。

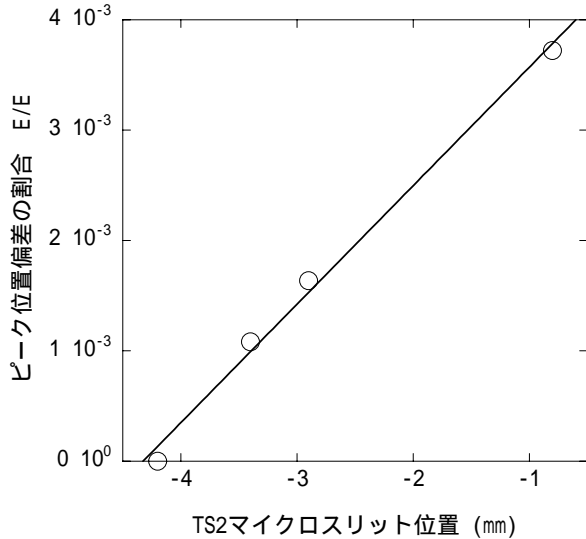


図5：半導体検出器ピーク位置偏差の割合とTS2マイクロスリット位置との関係

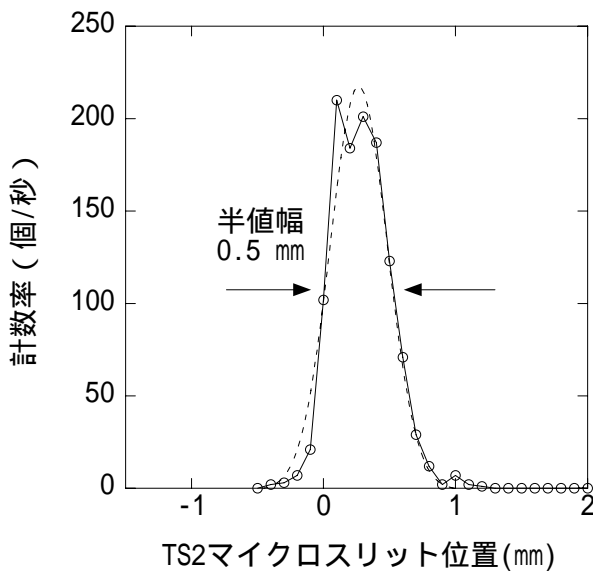


図6：シングルターン引き出し時のエネルギー幅

4．エネルギー幅計測結果

260MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ ビームにおいて実現しているシングルターン引き出し時のビームエネルギー幅計測を実施した。その結果、シングルターン引き出しでは0.05%、全体磁場をわずかにずらしてマルチターン引き出しとした場合には0.1%のエネルギー幅が得ら

れた。図6にシングルターン引き出し時のイメージ位置でのビーム分布を示す。ビーム全体に対するエネルギー幅を算出するために、複数のオブジェクト位置に対するイメージ位置でのビーム分布を足し合わせている。

5．まとめ

分析電磁石を用いたビームエネルギー幅計測システムを構築した。半導体検出器で得られたエネルギースペクトルを用いてその性能を評価し、設計通りであることを確認した。本システムによって、サイクロトロンで加速したビームのエネルギー幅計測を行い、シングルターン引き出し時のビームエネルギー幅が、通常マルチターン引き出し時のビームエネルギー幅より小さいことが確認できた。目標のエネルギー幅0.02%を達成するために、本システムを用いてビームエネルギー幅計測を行い、サイクロトロンパラメータのさらなる最適化を進める予定である。

参考文献

- [1] M. Oikawa, T. Kamiya, M. Fukuda, S. Okumura, H. Inoue, S. Masuno, S. Umemiya, Y. Oshiyama, Y. Taira, Nucl. Instr. and Meth. B210, 54 (2003).
- [2] M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, N. Miyawaki, T. Agematsu, Y. Nakamura, T. Nara, I. Ishibori, K. Yoshida, W. Yokota, and K. Arakawa, Rev. Sci. Instrum. 74 (4), 2293 (2003).
- [3] S. Okumura, K. Arakawa, M. Fukuda, Y. Nakamura, W. Yokota, T. Ishimoto, S. Kurashima, I. Ishibori, T. Nara, T. Agematsu, M. Sano, T. Tachikawa, Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005).
- [4] S. Kurashima, N. Miyawaki, S. Okumura, I. Ishibori, K. Yoshida, H. Kashiwagi, M. Fukuda, Y. Nakamura, T. Agematsu and Y. Nakamura, TIARA Annual Report 2004, JAEA-Review 2005-001, 349-351 (2006).
- [5] S. Okumura, S. Kurashima, N. Miyawaki, K. Yoshida, and M. Fukuda, Rev. Sci. Instrum. 76, 113106 (2005).
- [6] H. A. Enge, Focusing of Charged Particles, ed. A. Septier (Academic Press, 1967), Vol. II, 203-264.