

Development of the main probe for measuring a beam phase width in the JAEA AVF cyclotron

Nobumasa Miyawaki^{1,A)}, Susumu Okumura^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Ken-ichi Yoshida^{A)},
Yosuke Yuri^{A)}, Takahiro Yuyama^{A)}, Ikuo Ishibori^{A)}, Takashi Agematsu^{A)}, Tomohisa Ishizaka^{A)}, Takayuki Nara^{A)},
Mitsuhiro Fukuda^{B)}, Takamasa Ueda^{C)}, Toshiki Tachikawa^{C)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

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

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{C)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

5-2 Soubiraki, Niihama, Ehime, 792-8588

Abstract

The main probe of the JAEA AVF cyclotron has been modified to measure a beam phase width in the accelerating region without extracting the beam from the cyclotron, which could cause the beam loss at the extraction device. The main probe consists of a carbon block for a beam current measurement and a plastic scintillator for a beam phase measurement. The photomultiplier for the plastic scintillator has been located at the end of the main probe outside the return yoke in order to minimise the influence of the magnetic field. The scintillation, produced on entering ions, was transmitted through the optical cable and the light-guide to the photomultiplier. In order to study the effect of light transmission between the plastic scintillator and the photomultiplier, we measured the time spread of the light produced with a laser pulser. In the case of 45MeV- H⁺ beam, a correlation between the beam phase width and the position of phase slits was confirmed.

AVFサイクロトロンにおけるビーム位相幅計測用メインプローブの開発

1. はじめに

原子力機構AVFサイクロトロン(K=110)では、微小領域における宇宙用半導体のシングルイベント効果等の材料科学研究や生物細胞への局所照射による生体機能解明研究などのために、4連四重極電磁石を用いたビーム集束方式によって、1 μ m以下のビーム径及び照準位置精度を有する重イオンマイクロビーム形成を行っている^[1]。マイクロビーム形成では、集束電磁石での色収差による影響を抑えるために、ビームエネルギー幅 $\Delta E/E \leq 0.02\%$ (FWHM)の必要がある^[2]。そこで、均一なエネルギー利得が得られる時間(加速位相)領域を拡大するフラットトップ加速システムを開発した^[3]。ビームバンチの時間幅をこのエネルギー利得が均一な位相幅内に制限するために、高精度のビーム位相幅制御が可能な中心領域の機器を新たに開発した結果、サイクロトロン出口直後のビーム診断ポート(CS0)にあるプラスチックシンチレータを用いた計測において、ビーム位相幅約1rf度(FWHM)が得られた^[4]。

しかし、CS0でのビーム位相幅計測では、引出し機器とビームが干渉したと考えられるビーム位相分布の欠損や消滅などを含んでおり、中心領域の位相

スリットとビーム位相との相関関係を直接示しているとは言えない。そこで、引き出し機器の影響を受けないサイクロトロン内部でのビーム位相幅の計測を行うため、加速領域のほぼ全半径にわたって電流計測を行っているメインプローブに、プラスチックシンチレータを付加した新たなプローブを開発した。開発したメインプローブとCS0プラスチックシンチレータを用いてビーム位相幅計測を行い、サイクロトロン内外での違いを比較した。

2. 新メインプローブ開発

2.1 電流と位相計測の両立

メインプローブは、側ヨーク貫通孔から挿入され、半径41.5mm~1191.5mm(ストローク1150mm)間で加速されているビーム電流を計測するために使用される。従来使用していたメインプローブは、全ビーム電流を測定するカーボンブロックとタンタルを組み合わせたインテグラルヘッドと、その背後で上下方向に並んだ3つの金属片を突出することで半径方向の微分ビーム電流分布を測定できるディファレンシャルヘッドで構成されており、全ビーム電流の検

¹ E-mail: miyawaki.nobumasa@jaea.go.jp

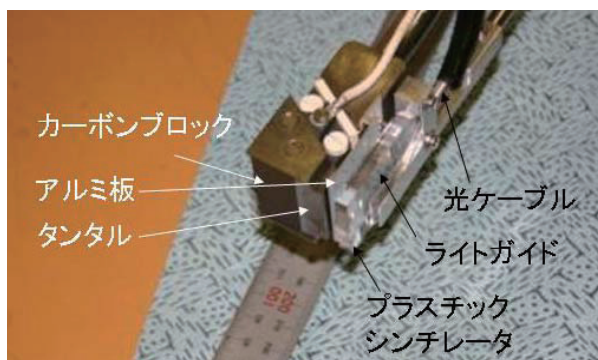


図1：開発したメインプローブの先端部。ビーム進行方向は図の左から右である。ビーム軌道は螺旋状であるため、半径が大きくなるほどビームエネルギーが高く、常にプローブ先端部にビームが当たる。

出、上下方向の電流分布、ターンセパレーション、ターン数の情報が得られる。新メインプローブの開発では、目的であるビーム位相幅計測の他に、通常の運転や新ビーム加速におけるビーム電流計測の必要性や過密な運転計画でのプローブの差し替え時間確保の難しさなどの理由から、電流計測との両立が求められた。

そこで、電流検出用のインテグラルヘッドは、従来使用していたメインプローブと同じ方式とし、ビーム位相幅計測用として、ディファレンシャルヘッドをCS0で使用している同種のプラスチックシンチレータ ($5 \times 5 \times 24 \text{mm}^3$) に置き換えた。その発光を輸送するために、ライトガイドと光ケーブルを用いた。ビームによる劣化を避けるため、不使用時にはシンチレータをインテグラルヘッド後方へ退避できるように、駆動距離を従来の5mmから20mmへと大きくした。図1に開発したメインプローブ先端部を示す。

μA 級のビーム電流を引出半径付近で計測した場合、最大数kWの入熱となり、カーボンブロックは 1000°C 以上の高温になる。一方、インテグラルヘッドの後方でビームから退避しているプラスチックシンチレータは、 70°C と低い熔融温度のため、この輻射熱で熔融する可能性がある。熱解析の結果、入熱95Wで熔融温度に達することがわかった。そこで、インテグラルヘッドとディファレンシャルヘッドとの間に、厚さ1mmのアルミ板を設置して冷却することにより、540Wの入熱でもプラスチックシンチレータは 70°C 以下となり、従来のメインプローブと変わらない程度のビーム電流量を計測できることを確認した。さらに、冷却効率を上げるため、間接冷却部の接触面積を増加する形状に最適化を行った。しかし、アルミ板の設置により、サイクロトロン内へ挿入孔の直径以下に収まらないため、カーボンブロックの厚さを3mm薄くする必要があった。そこで本サイクロトロンで最も飛程の長い加速条件である H^+90MeV が完全に制止できることを、SRIMコード^[5]により確認した。

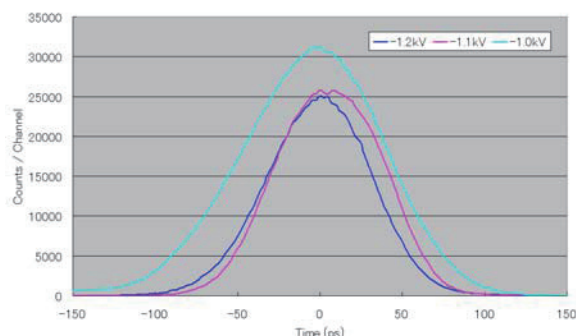


図2：新メインプローブを用いたレーザー光の時間幅測定の結果。光電子増倍管への印加電圧を-1.0～-1.2kVに変化させて比較した。

2.2 光信号の輸送

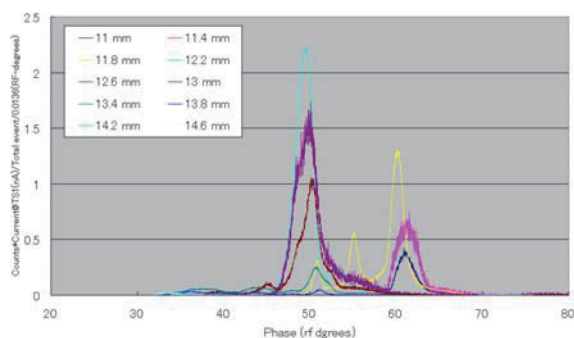
ディファレンシャルヘッド先端でシンチレータとビームとの相互作用により発生した光は、光電子増倍管で電気信号に変換する必要がある。しかし、シンチレータのあるサイクロトロン加速箱内は、高真空、高磁場、RFノイズ等の過酷な環境のため、光電子増倍管をシンチレータ直近に設置する事が困難である。そこで、メンテナンスの容易さを考慮して、大気中であつ磁場の影響が少ないプローブの末端に、光電子増倍管を設置した。しかし、シンチレータから光電子増倍管まで非常に経路が長く、複数の接合部があることから、光の散乱等による時間分解能の劣化が懸念された。そこで、パルスレーザー装置を用いて、光信号の劣化について検証した。

パルスレーザー装置は、NIMモジュール型ピコ秒ライトパルサPLP-04 (浜松ホトニクス社製) を用いた。指向性のあるレーザー光をシンチレーション光として模擬した。シンチレータでの発光は等方的であり、そのうち一部がライトガイドと光ケーブルに入って輸送されることから、レーザー光の入射方向は光ケーブルに対して平行にした。得られた光電子増倍管からの信号は、200MHzコンスタント・フラクション・ディスクリミネータ(CFD)(ORTEC 935)で時間信号に変換して、ピコ秒時間分析器(pTA)のスタート信号として入力し、パルスレーザー装置からのトリガー信号をpTAのストップ信号として入力し、信号の時間幅を調べた。測定結果を図2に示す。光電子増倍管の印加電圧の増加に伴って、測定された時間幅が狭くなることを確認した。レーザーのパルス幅(50ps)や同期トリガー出力と光出力間のジッタ($\pm 10\text{ps}$)に対して、光電子増倍管への印加電圧-1.2kVの時で、時間幅は約74ps(FWHM)に広がっており、接続部や輸送長による影響の可能性はあるが、計測には十分な時間分解能である。

3. ビーム位相幅計測

AVFサイクロトロン引き出し機器によるビーム位相幅への影響を調べるため、45MeV- H^+ ビームを用いて、加速器から引出す前の半径841.5mm位置で、また引き出し後はCS0でビーム位相計測を行った。

(a) CS0でのビーム位相分布



(b) メインプローブでのビーム位相分布

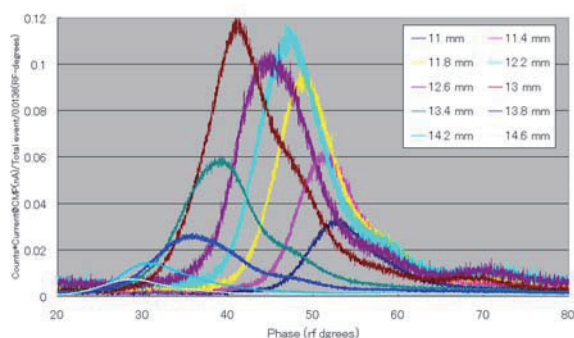


図3：測定したビーム位相分布。横軸スケールはrf位相（相対値）、縦軸はチャンネル当たり、全カウント数当たりのカウントとその場所での電流量の積であり、位相スリット位置を11～14.6mmの間を0.4mm間隔で変化させ、スリットギャップ0.8mm固定でそれぞれ測定した。

メインプローブのこの半径では、ターンセパレーションは2mm以下で、シンチレータ幅5mmに比べて小さいため、加速しているビームを全て検出できる。検出部の構造による測定結果の比較のため、両測定ともシンチレータ、ライトガイド、光電子増倍管はほぼ同じ仕様であり、光電子増倍管以降の信号処理系も共通とした。前節の通り、検出部から光電子増倍管までの距離とライトガイドと光ケーブルの接合回数は異なる。図3にCS0とメインプローブでのそれぞれのビーム位相分布を示す。

結果を比べると、メインプローブに対してCS0の縦軸が20倍になっており、メインプローブでのビームの検出効率が悪く、検出部の構造の差が影響していると考えられる。CS0の結果では45～65度の範囲に細いピークがあり、条件によっては複数のピークを持つが、位相スリット位置とビーム位相との相関関係は認め難い。一方メインプローブでは、30～60度の範囲で位相スリット位置に対応して、ビーム位相のピークが変化することから、位相スリット位置とビーム位相との強い相関が認められる(図4)。

H⁺45MeVの加速条件では、周回数が550ターンと

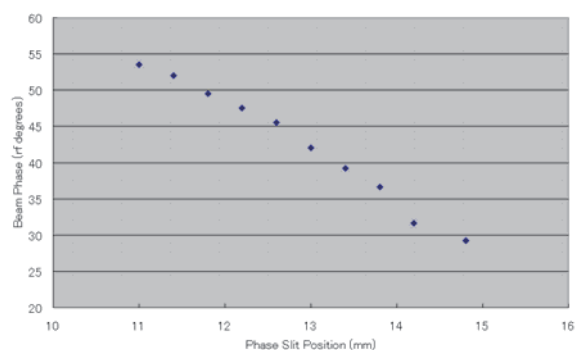


図4：位相スリット位置とビーム位相の関係。

多いためにマルチターン引出しであり、引出し機器との干渉は避けられない。CS0のピークの位相は、位相スリット位置に因らず、ほぼ3箇所て固定していることから、引出し機器でもビーム位相が制限されていることが確認できた。また、位相スリット位置13mmの場合、メインプローブでの位相幅は、10.8rf度(FWHM)であり、CS0での位相幅は2.4rf度(FWHM)であり、約5倍の差があった。レーザーを用いた実験結果での位相幅の広がりも考慮しても、この違いは大きく、引出し後のビーム位相測定では、位相幅を過小評価する可能性が高い事がわかった。

4. まとめ

原子力機構AVFサイクロトロン加速器内部の位相幅計測のため、新たにメインプローブを開発した。電流計測との両立や各種制約条件を考慮した結果、従来の金属製ディファレンシャルヘッドの代わりにプラスチックシンチレータを用い、その光を加速箱の外の大気中にある光電子増倍管へ光ケーブルで輸送する機器配置とした。レーザーを用いた実験では、十分な時間分解能が確認できた。ビーム実験では、引出し機器前後での位相計測結果より、主に引出し機器によるビーム損失で、位相幅が狭くなっていることが確認できた。また、位相スリットとビーム位相の相関関係が明らかにでき、中心領域での位相制御において、本プローブの有効性が示された。

今後、ビームエネルギーが低く、検出が難しい、半径の小さな領域においても計測ができるように、検出効率の改善を行うため、検出部分の形状や材質の変更などについて検討を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Fukuda, et al., "Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B210, 33 (2003)
- [2] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 210, 54 (2003)
- [3] S. Kurashima, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B,260, 65 (2007).
- [4] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 913 (2006).
- [5] <http://www.srim.org/>
- [6] M. Fukuda, et al., Rev. Sci. Instrum. 74, 2293 (2003).