

マイクロスリットを用いたビームエネルギー幅測定技術の開発

奥村 進、石堀郁夫、福田光宏、宮脇信正、倉島 俊
上松 敬、奈良孝幸、吉田健一、中村義輝、荒川和夫

日本原子力研究所 高崎研究所 〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

概要

原研 AVF サイクロトロンでは、集束方式による直径 $1\mu\text{m}$ のマイクロビーム形成を実現するために必要な、集束レンズでの色収差抑制のため、フラットトップ加速によるビームエネルギー幅縮小化技術の開発を進めている。既設分析電磁石を利用して、ビームエネルギー幅計測を行うために、マイクロスリットを用いたビームエネルギー幅計測システムの開発を行った。計測システムおよび開発した計測用機器について述べる。

1 序論

日本原子力研究所 高崎研究所では、イオンビームの材料科学やバイオ科学への応用を推進するために、イオン照射研究施設 TIARA を建設した。AVF サイクロトロンおよび静電加速器 3 台を設置し、マイクロビーム照射をはじめとする、さまざまなイオンビームの高度利用を行っている。

TIARA の静電加速器では既に、集束レンズを用いた直径 $1\mu\text{m}$ のマイクロビーム形成に成功し、日常的に照射利用されている。一方、サイクロトロンでは、ビームエネルギー幅が静電加速器よりも広く、集束レンズでの色収差のため、直径 $1\mu\text{m}$ のマイクロビームを形成することは困難であるとされてきた。このため、集束レンズを用いない、コリメータ方式によるマイクロビーム形成をこれまで行ってきたが、達成できるビーム直径は、 $5\sim 10\mu\text{m}$ が限界であった。このため、細胞内の特定部位照射など、高位置分解能を必要とする微視的研究の推進が困難であった。そこで、サイクロトロンのビームエネルギー幅を、従来の $\Delta E/E=10^{-3}$ から 10^{-4} 台へと縮小化を図り、集束レンズによる直径 $1\mu\text{m}$ のマイクロビーム形成を実現するために、フラットトップ加速技術の開発を進めている。フラットトップ加速によって、サイクロトロンでの加速エネルギー利得の一定化を図り、引き出されるビームエネルギーのばらつきを $\Delta E/E=10^{-4}$ 台へと抑制することが可能となる。

このビームエネルギー幅を達成するためには、高精度なエネルギー計測手段が必要である。エネルギー分解能の優れた半導体検出器でも、必要とされる測定精度 $\Delta E/E=10^{-5}$ 台の達成は困難である。また、スペクトログラフや飛行時間法を適用するためには、新たな測定用ポートを照射室に確保する必要がある。そのうえ、計測のために照射室へのビーム輸送が必要となり、迅速なビームエネルギー幅の調整・計測が難しい。

そこで、余分なビーム輸送を行わず、わずかな機器設置スペースの確保で、ビームエネルギー幅計測を実現す

るために、既にビームラインに設置している偏向電磁石を用いたビームエネルギー幅計測方法を検討した。この電磁石はビーム輸送だけではなく、ビームエネルギーの評価も目的として設置された「分析電磁石」である。この分析電磁石を含む現状のビーム輸送光学系で、測定精度 $\Delta E/E=10^{-5}$ を達成するために必要な条件を検討し、ビームエネルギー幅計測システムの開発を行った。システムの概要と開発した計測用機器について述べる。

2 ビームエネルギー幅計測システム

2.1 サイクロトロンのビーム輸送光学系

図 1 に分析電磁石を含むビーム輸送系を示す。サイクロトロンから引き出したビームは、三連四極電磁石による集束を受け、まず最初の集束点 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、ビームは分析電磁石による 80 度偏向を受けた後、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。各集束点には、ビーム強度をモニタするファラデーカップなどのビーム診断機器があり、これらの機器設置のために、標準化された真空チャンバー（ビーム診断ステーション）が設置されている。

分析電磁石によるビームエネルギー評価には集束点 TS1（オブジェクト位置）から TS2（イメージ位置）の光学系を利用している。TS1 と TS2 に設置しているビームスリットで、スリット幅を最小値 1mm に設定してエネルギー分析を行い、NMR 磁場測定装置で得た磁場の値から、ビームエネルギーを算出している。

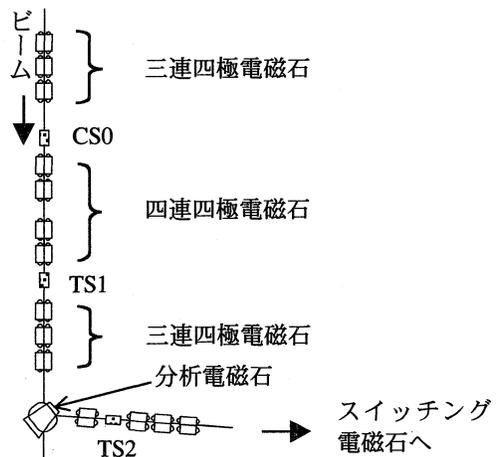


図 1：分析電磁石を含むビーム輸送系

2.2 ビームエネルギー幅計測システム

分析電磁石を用いたビームエネルギー幅計測では、分析電磁石での運動量分散によるビームの拡がりを利用する。そこで、ビーム輸送光学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[1]。

$$P / \Delta P = (R \cdot D) / Si \quad (1)$$

但し、 $Si = M \cdot So$

P: 運動量, R: 軌道半径 (1m)

D: 分散, M: 拡大率

So: オブジェクトのスリット幅

Si: イメージのスリット幅

ここで、通常のビーム輸送条件を用いて、オブジェクト位置 TS1 からイメージ位置 TS2 のビーム輸送光学系を対象にして、分散Dと拡大率Mを計算コードTRANSPORTで求めた。その結果、 $D = 2$ 、 $M = -1$ となり、上式より、オブジェクトおよびイメージでのスリット幅によって、このビーム輸送光学系の運動量分解能が決まる。エネルギー測定精度 $\Delta E/E = 10^{-5}$ 台を達成するために必要なスリット幅は、上式および $\Delta E/E = 2 \Delta P/P$ の関係より求め、オブジェクトおよびイメージスリット共に $10 \mu\text{m}$ である。そこで、マイクロスリットを用いたビームエネルギー幅計測システムの開発を行った。

TS1 にはオブジェクトスリットを設置し、ビームサイズと共にビーム発散角も制御するため、2組のマイクロスリットを兼ね備え、上流の既設ビームスリットで余分なビームを取り除くことで、スリット先端での発熱を抑制する。TS2 にはイメージスリットを設置し、1組のマイクロスリットでギャップ位置の走査を行い、各位置での通過ビーム強度を測定してビームサイズを求める。スリットを通過するビーム強度は著しく少なく、 1pA 未満となるため、半導体検出器等を有する微小ビーム強度モニタでビーム強度を測定する。また、ビームサイズ計測時間の短縮を目指して、リアルタイムでビームサイズ測定が可能な、発光体を用いたビームモニタも設置する。

これら新たな機器の設置スペースがビームラインには残されていないため、既設機器の撤去および改良によりスペースの確保を図った。TS1 では、従来型アルミナモニタで使用していた、のぞき窓専用ポートを流用するために、のぞき窓一体型アルミナモニタを開発した。これによって、オブジェクトスリット設置ポートを確保した。TS2 では、従来型ビームスリットを撤去し、イメージスリットなどの機器設置ポートを確保した。また、既設ビーム診断ステーションを利用するため、機器設計の制約条件があり、ポートサイズ (内径) は、TS1 が 97mm 、TS2 が 146mm 、取付フランジ面からビーム軸までがすべて 200mm 、対向する設置機器同士のチェンバー内部での干渉の回避、などである。

3 開発機器の仕様

3.1 オブジェクトスリット

2組のマイクロスリット (上流側: サイズ制御用、下

流側: 発散角制御用) は、大気側から個別にスリット幅の設定が可能である。上流側スリットはマイクロメータヘッドによる手動で、下流側スリットはモーター駆動で、対向するスリット先端の位置設定を行う。スリット先端位置の設定範囲はビーム軸に対して $\pm 5\text{mm}$ で、 $1 \mu\text{m}$ の分解能で設定が可能である。2組のスリットはモーターによる全体駆動が可能で、使用しないときの退避およびスリット位置の微調整を行う。スリット先端部は、直径 4mm 、長さ 12mm の円柱型タングステンカーバイト製で、冷却は行っていない。(図2参照)

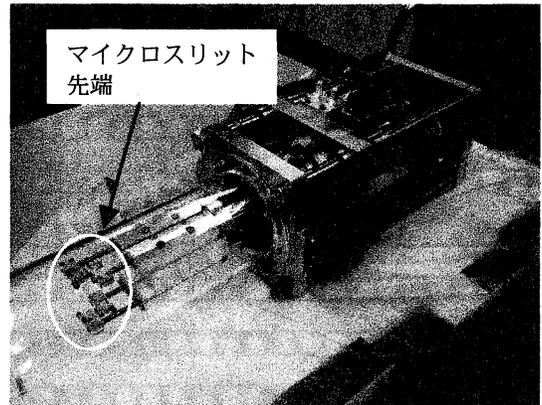


図2: オブジェクトスリット

3.2 イメージスリット

1組のマイクロスリットを備え、基本仕様はオブジェクトスリットの上流側スリットと同じである。オブジェクトスリット同様、モーターによる全体駆動が可能である。

3.3 微小ビーム強度モニタ

半導体検出器およびファラデーカップを備え、ビーム強度に応じて検出器を使い分ける。モーターによって全体駆動を行い、ビームへの挿入位置を変更することで、検出器の選択および退避を行う。半導体検出器を2台設置することで、検出器劣化時の即時対応が可能である。(図3参照)



図3: 微小ビーム強度モニタ

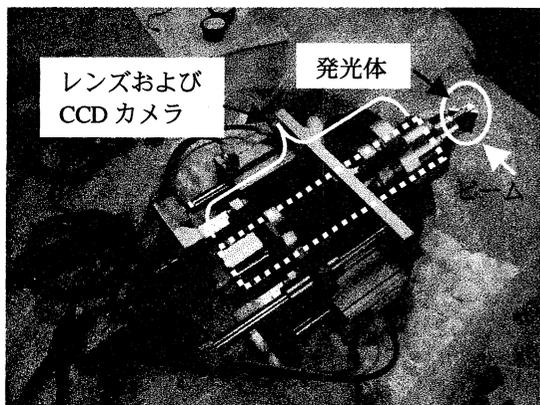


図4：発光体を用いたビームモニタ

3.4 発光体を用いたビームモニタ

ビームによる発光イメージを CCD カメラで観測し、イメージサイズをリアルタイムに測定する。10 μ m の微小ビームサイズに対応するために、顕微鏡用レンズ（最大倍率：245 倍）および、微弱発光の観察が可能な冷却型 CCD カメラを用いる。顕微鏡用レンズの観察距離 54mm を実現するために、発光体直近にレンズおよび CCD カメラの設置スペースを確保した。（図4 参照）

4 マイクロスリットのテスト

マイクロスリットでは、スリット先端を支持しているロッドの挿入・引き抜き動作を大気側から行って、スリット先端の位置を調整し、スリット幅の設定を行う。使用しているマイクロメータヘッドの分解能は 1 μ m であるが、実際のスリット先端位置はマイクロメータヘッドでの設定通りとは限らない。そこで、スリット先端位置の変位量をリニヤゲージで測定し、マイクロメータヘッドでの設定値との関係を調べた。図5のように駆動方向が一定であれば、スリット先端位置の設定値からのずれは小さく、ずれ幅は 1~2 μ m に収まっている。一方、駆動方向を変更した際には、ずれが大きくなり、この場合で 8 μ m となっている。この原因はマイクロメータヘッドでのバックラッシュと考えられる。図5ではマイクロメータヘッドの設定を 0~2mm の範囲で 0.5mm ずつ 2 往復変更している。この結果から、スリット先端位置の設定は同一駆動方向で行うことが必要で、これによって設定精度 1~2 μ m が可能である。

また、温度変動により、スリット先端位置が変化する可能性があり、スリット先端温度を変化させながら、スリット先端位置の変位量をリニヤゲージで測定した。ビームを模擬して、スリット先端に光源を近接し、直接光が入らないスリット先端のホルダー部に白金薄膜測温抵抗体を取り付けて温度測定を行った。図6のように、温度に比例してスリット先端位置が変位している。スリット先端を支持しているロッド（長さ 350mm）の熱膨張がこの変位の主な原因と考えられる。今回の測定では、温度測定は先端 1 点のみで、測定環境も大気中であるが、グラフから変位量の温度係数を求めると、0.3 μ m/ $^{\circ}$ C となり、数 $^{\circ}$ C の温度変化は許容できると考えられる。

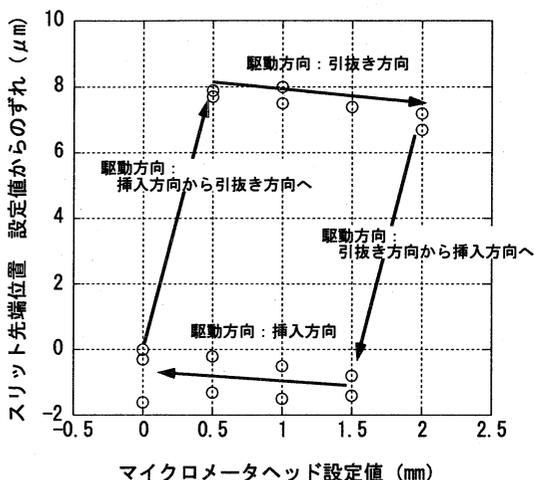


図5：マイクロメータヘッドの設定とスリット先端位置との関係

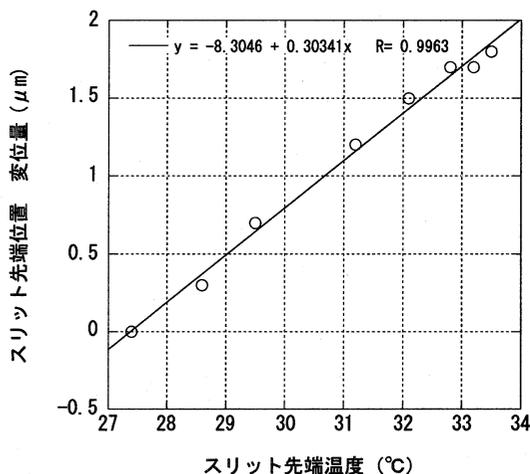


図6：スリット先端位置の温度依存性

5 まとめ

サイクロトロンでのビームエネルギー幅計測を高精度に、かつ迅速に行うために、既設分析電磁石を用いた計測システムの検討を行った。その結果、測定精度 $\Delta E/E=10^{-5}$ を達成するためには、スリット幅 10 μ m のマイクロスリットを用いる必要があることが判明した。そこで、マイクロスリットの開発を行うと共に、そのテストを実施し、マイクロメータヘッドでのバックラッシュおよび温度変動に対する対策を行うことでスリット幅 10 μ m が実現可能であることがわかった。

参考文献

[1] H. A. Enge, Focusing of Charged Particles, ed. A. Septier (Academic Press, 1967), Vol. II, 203-264.