

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561048

研究課題名(和文) 数100MeV級イオンマイクロビーム安定化のためのビームモニタの開発

研究課題名(英文) Development of Beam Monitor for Stabilization of Hundreds MeV Ion Microbeam

研究代表者

佐藤 隆博 (Sato, Takahiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・研究副主幹

研究者番号：10370404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、数100MeV級高エネルギーイオンマイクロビームの強度分布を測定するビームモニタの開発を目的とした。具体的には、薄いシンチレータを直付けした撮像素子によってビーム強度を測定した。シンチレータとして透明度と輝度が高くイオンビーム照射によるダメージが比較的少ないフッ化カルシウムを選択した。また、撮像素子としてCCDやCMOSを使用した。260MeVネオンビームの照射実験の結果、CCDの場合、数カウント/秒のビームの照射位置を7 $\mu$ m以下の空間分解能で取得できた。また、CMOSの場合、数100カウント/秒のビーム強度を検出可能であった。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to development of a beam monitor for measurement of intensity distribution of hundreds MeV ion microbeam. Specifically, the beam intensity was measured by imaging devices covered with scintillator. Calcium fluoride was selected as scintillator because it has the high degree of transparency and luminance, and little damage by beam irradiation. CCD and CMOS were used as imaging devices. As a result of irradiation experiment with 260 MeV neon beam, it was possible for the monitor to detect irradiation positions of the beams of a few counts per second with the spatial resolution of less than 7  $\mu$ m in the case of CCD. Furthermore, the beams of hundreds counts per second were detectable in the case of COMS.

研究分野：イオンビーム工学

キーワード：イオンビーム ビームモニタ シンチレータ CCD CMOS

1. 研究開始当初の背景

申請者は、生体や半導体デバイスに対する放射線被ばく影響を、細胞 1 個 1 個、半導体デバイス 1 個 1 個レベルで解明するために、AVF サイクロトロンを用いた数 100 MeV 級集束式高エネルギーイオンマイクロビーム形成装置を開発し[文献 ]、260 MeV の Ne イオンを用い固体飛跡検出器 (CR-39) をターゲットに用い、半値幅で約 0.6 μm の照射精度でイオン 1 個 1 個をねらった位置にヒットさせることに成功した (図 1)。

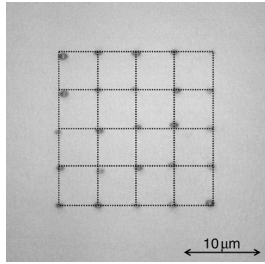


図 1 260 MeV の Ne イオンを 5 μm 間隔に固体飛跡検出器 (CR-39) 1 イオンずつ照射して作成したエッチビット

集束式のイオンマイクロビーム形成装置においては、図 2 に示すようにオブジェクトスリットで物点を作り、発散制限スリットで発散角を制限した後、精密四重極電磁石を用いて焦点に集束させる。そのため、ビーム軌道がスリット中心からずれると、焦点位置で得られるビーム強度が著しく減少し、安定して試料に照射できない大きな原因となっていた。特に、培養細胞を用いた放射線被ばく影響の研究においては、直接イオンがヒットしていない細胞がアポトーシス (自死) を起こす放射線誘発パイスタンダー効果の解明が必要であり、狙った細胞 1 個に 95% 以上の確率で安定的にイオンをヒットさせなければならない。また、統計的に有意な結果を得るためには、多数の細胞を 1 個 1 個照射することが不可欠であるため、数時間にわたってビーム軌道を安定に維持する必要があった。従来、ビーム軌道の観測には金属線をビーム軌道に交差させてその電流を読みとるプロファイルモニタが用いられるが、シングルイオンヒット実験時には、ビーム電流がフェムトアンペア以下と非常に微弱であるため、高速な計測が困難であった。同様に X 方向と Y 方向のビームスリットの上下左右の電流差からビームのずれを検出する方法も適用できなかった。アルミナなどに照射し、その発光をビューポートを通して望遠レンズと CCD (charge-coupled device) カメラで観測することは従来から行われていたが、ビームを遮ってしまうので試料照射中は使用できないだけでなく、フェムトアンペア級のビームでは発光が微弱であり、本用途には適さなかった。

そこで申請者は、薄膜シンチレータを直付

けた CCD 素子によってビーム強度を測定する空間分解能と感度を高めたビーム強度検出器を開発し、発散制限スリットの直前に左右に 2 つ設置してビームの散乱成分を含めたモニタとして使用し、その測定結果からビーム軌道のずれをリアルタイムで補正することを着想した。

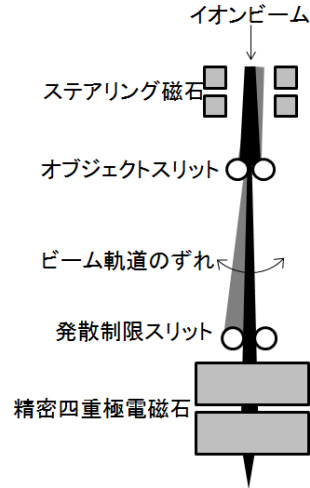


図 2 高エネルギーイオンマイクロビーム形成装置の模式図。スリット上での軌道のずれが、得られるビーム強度を大きく変化させる。

2. 研究の目的

本研究では、薄いシンチレータを直付けした CCD や CMOS (complementary metal oxide semiconductor) センサを用いて、数百 cps ~ フェムトアンペア級の集束式高エネルギーイオンマイクロビームの散乱成分強度分布を数 10 μm の空間分解能で高速に測定するビームモニタを開発することを目的とした。このビームモニタを用いると、図 2 のような測定結果を得ることができる。高エネルギーイオンマイクロビームの照射では、照射によってシンチレータが徐々にダメージを受けるとともに、同時に発生するガンマ線によって、CCD にノイズを生じさせ、場合によっては素子を破壊する。このため、得られた測定画像はそのまま使用できないと考えられた。

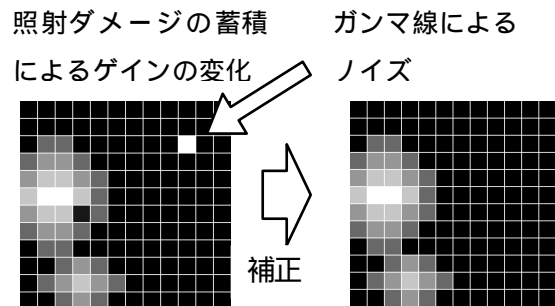


図 3 開発したビームモニタによって得られる画像

そこで申請者は、シンチレータのダメージの蓄積等を考慮して画素毎のゲインの変化を画像処理でフィルタリングすることを考案した。その結果得られた画像から、ビーム軸のずれを計測し、図4に示すように、そのずれを修正しビームの極大部分が左右のビームモニタの中心を通るように、ステアリング磁石の電流を調整すれば、数時間にわたってビーム強度を安定化させることが可能になる。

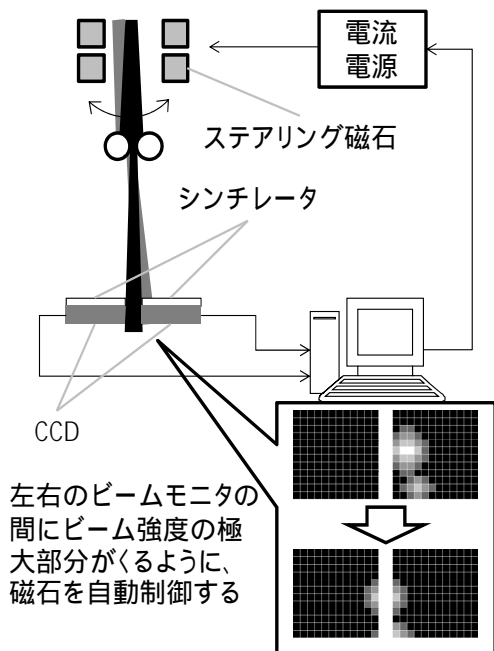


図4 ビームモニタを用いたビーム軌道安定化の概念図

### 3. 研究の方法

本研究課題で開発するビームモニタは、培養細胞をターゲットとしたシングルイオンヒット実験に使用するため、細胞を貫通する十分な飛程（水中飛程：約 400  $\mu\text{m}$ ）を有する 260 MeV の Ne マイクロビームで使用することを想定して設計を行った。

(1) シンチレータには、NaI(Tl)の約半分の発光効率であるが、潮解性が無く扱いやすい  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  を使用した。一般的な  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  の密度 3.18  $\text{g}/\text{cm}^3$  を用いて SRIM コード[文献]で計算すると、260MeV の Ne の飛程は 183  $\mu\text{m}$  であるため、イオンが CCD に直接入射しないように、シンチレータは 183  $\mu\text{m}$  より厚くしなければならない。しかし、厚すぎる場合、光の拡散により空間分解能が悪化すると予想された。そこで、安定して製作可能な 500  $\mu\text{m}$  の厚さの  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  を使用した。

この  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータにイオンビームが照射された際の発光量と発光位置を検出する予備実験として、まず対物 20 倍のレンズを備えた光学系に、画像を増強するイメージンテンシファイア接続し、それを 2/3 型で画素サイズが 11.6  $\mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$  の CCD センサで測定するシングルイオンヒッ

ト位置検出システムを開発した。この検出システムでは、CCD から 720  $\times$  429 ピクセルの画像が得られ、それはシンチレータ上の 1,307  $\mu\text{m} \times 872 \mu\text{m}$  に相当し、今回の実験に十分な空間分解能を有していると考えられる。そこで、このシングルイオンヒット位置検出システムの上に、イオンの照射位置にエッチピットを形成する固体飛跡検出器 (solid state track detector) を重ね、260 MeV の Ne マイクロビームを用いた照射実験を行い、エッチピットの位置とシングルイオンヒット位置検出システムで得られた照射位置を比較することで、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  をシンチレータとして用いた場合の、空間分解能を検証した。

(2) 次に、実際に図5のような  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータを 1/4 型で画素サイズが 2.8  $\mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$  の CMOS センサに直付けしたビームモニタを開発し、3 MeV の H マイクロビームや、260 MeV の Ne マイクロビームを用いた照射実験を行い、その照射位置の検出精度を調べた。

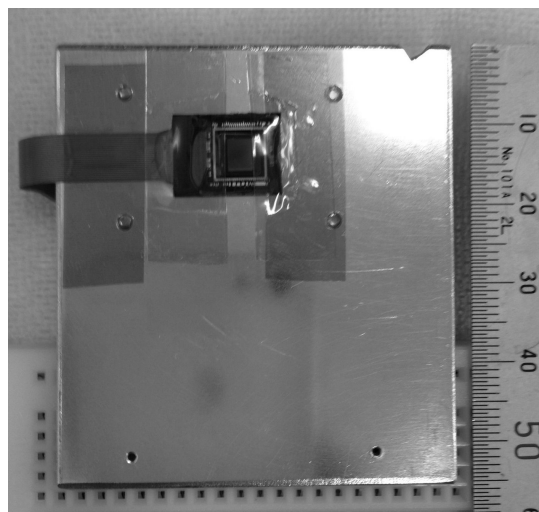


図5 作製したビームモニタ。CMOS センサ上に 5 m  $\times$  5 m  $\times$  500  $\mu\text{m}$  のシンチレータを設置した。データの読み出し回路は散乱ビーム等が当たらないようアルミの遮蔽の裏に配置した。

(3) さらに、この作製したビームモニタを用いビーム強度の変動を検出し、ビーム軌道を調整するステアラー電磁石等にフィードバックするために、各画素から得られる強度分布をリアルタイムに取得しフィルタリングするプログラムを開発し、数分以上のビーム強度のモニタリングが可能か検証を行った。

### 4. 研究成果

(1) 260 MeV の Ne ビームを、固体飛跡検出器を通して  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータに照射した場合の、固体飛跡検出器のエッチピットを顕微鏡で観察した写真を図6に示す。イオンが照射された位置にエッチピットが形成さ

れている。

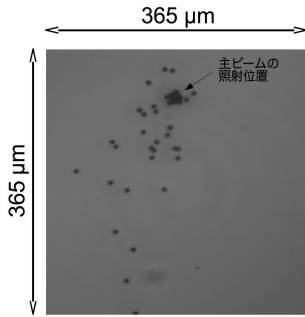


図 6 260 MeV Ne ビーム照射後エッチングした固体飛跡検出器表面の光学顕微鏡像。

図 7 にシングルイオンヒット位置検出システムで測定した照射位置を示す。

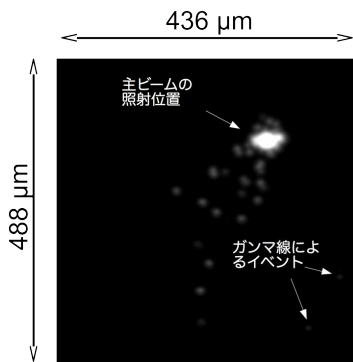


図 7 260 MeV Ne ビームをシングルイオンヒット位置検出システムで測定した結果

図 6 と図 7 を比較すると、固体飛跡検出器のエッチピットの位置と、シングルイオンヒット位置検出システムの検出位置が、ほぼ重なっていることが確認できた。それぞれのエッチピットと検出位置のずれを X 方向と Y 方向について比較したところ、図 8 に示すように、その半値幅は、X 方向  $4.9 \mu\text{m}$ 、Y 方向  $11.4 \mu\text{m}$  であり、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータを用いた場合、数 cps の強度のイオンビームの強度分布を  $10 \mu\text{m}$  前後の空間分解能で得ることが可能であることが実証された。

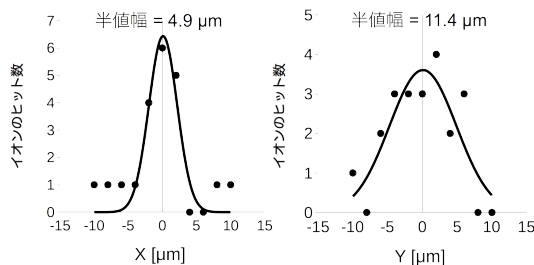


図 8 シングルイオンヒット位置検出システムで測定した位置と、固体飛跡検出器のエッチピットの位置のずれの分布

(2) 次に、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータを、 $1/4$  型で画素サイズが  $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$  の CMOS センサに直付けしたビームモニタに、3 MeV の H マイクロビームを、1 スキャンあたり 5 秒の速度で  $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$  の範囲を二次元スキャンしながら照射したところ、40 cps のビーム強度ではビームの分布が検出されなかったが、ビームラインのスリットを開き 360 cps まで強度を高めると、図に示すようなビーム強度分布を得ることに成功した。この図の縦縞はスキャン中のビーム強度の揺らぎを検出していたためと考えられる。

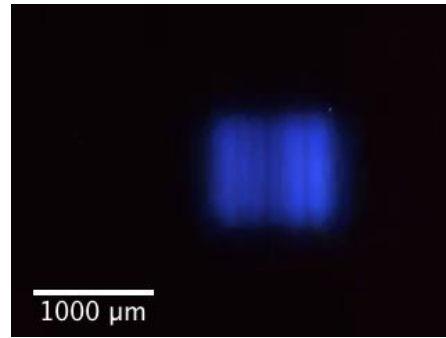


図 9  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータと CMOS イメージセンサによるビームモニタを用いた 3 MeV H ビームの強度分布測定結果。

さらに、260 MeV の Ne マイクロビームを用いた実験でも約 100 cps のビーム強度でビームスポットの位置を検出可能であった。以上から、本ビームモニタが当初目標としていた電流としては少ないビームの検出に十分な感度を有していることが示された。

(3) 作製したビームモニタの各画素から得られる強度分布をリアルタイムに取得しフィルタリングするプログラムの検証では、260 MeV Ne ビームを使用した。図 10 にプログラムの動作中の画面を示す。

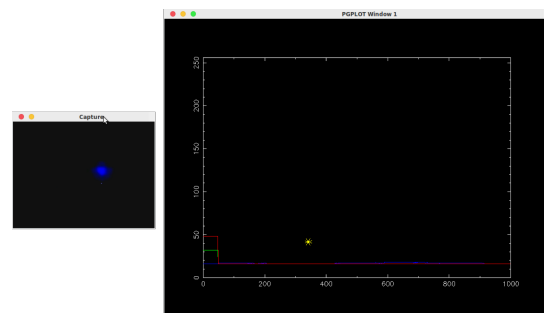


図 10 動作中のリアルタイム強度モニタプログラム。左のウィンドウは現在のビームモニタで検出しているビーム強度分布を表す。右のグラフは、縦軸がビーム強度横軸が時間で、ビーム強度分布からフィルタリングして得たビーム強度の時間変化を表す。

このように、ビームモニタから得られる強度

分布をリアルタイムでフィルタリングしてノイズを平均化し、強度分布の時間変化を計測することが可能となり、このデータを用いてビーム軌道を補正するビームシフト電磁石の電源を制御することで、ビーム軌道を安定化できる見通しが得られた。

研究者番号：60589117

(3)研究協力者

江夏 昌志 (KOKA, Masashi)

<引用文献>

M. Oikawa, T. Satoh, T. Sakai, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Kurashima, S. Okumura, M. Fukuda, W. Yokota, and T. Kamiya, "Focusing high-energy heavy ion microbeam system at the JAEA AVF cyclotron," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 260, no. 1, pp. 85-90, 2007.  
J. Ziegler, SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter. Lulu Press, Inc., 2015.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

T. Satoh, M. Koka, W. Kada, A. Yokoyama, and T. Kamiya, "Real-time single-ion hit position detecting system for cell irradiation," 査読有り, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 332, pp. 242-244, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.02.070>

[学会発表](計1件)

T. Satoh, M. Koka, W. Kada, A. Yokoyama, and T. Kamiya, "Real-Time Single-Ion Hit Position Detecting System for Cell Irradiation," 21<sup>st</sup> International Conference on Ion Beam Analysis (IBA 2013), Seattle (USA), June 23-28, 2013.

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 隆博 (SATO, Takahiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
原子力科学研究部門高崎量子応用研究所放射線高度利用施設部・研究副主幹  
研究者番号：10370404

(2)連携研究者

加田 渉 (KADA, Wataru)

群馬大学・大学院理工学府電子情報部門・助教