ガスシートを用いた電子ビームの検出*

萩原 徳男^{*1}・引地 裕輔^{*1}・神谷 潤一郎^{*1}・金正 倫計^{*1}

Detection of Electron Beam with a Gas Sheet

Norio OGIWARA^{*1}, Yusuke HIKICHI^{*1}, Junichiro KAMIYA^{*1} and Michikazu KINSHO^{*1}^{*1}J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

(Received November 30, 2015, Accepted February 9, 2016)

To demonstrate the function of a gas sheet for measuring the 2D profiles of accelerated beams, the following experiments were performed: 1) A gas sheet with a thickness of 1.5 mm and a density of 2×10^{-4} Pa was produced by the deep slit, and the shape of the sheet was improved by the thin slit. 2) For an electron beam of 30 keV and a diameter greater than 0.35 mm, the position and the 2D profiles were appropriately measured using the gas sheet.

1. はじめに

現在、大強度陽子加速器 J-PARC 3 GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS) においては、1 MW という大強度出力の達成をめざしているところであるが、このためには、ビームロスの徹底した低減が必要である。我々は、このためのビーム診断ツールとして、真空中にガスシートを発生させ、加速ビームとの衝突で生ずるイオンないしは光を用いてビーム診断を行う「ガスシートモニター」を開発中である。

3 GeV RCSにおいて、本ガスシートモニターを実現するためには、幅および奥行きとして300 mm 以上、シート厚2-3 mmのガスシートターゲットを作成する必要がある。また、本ガスターゲットの濃度は、 10^{-6} Pa 程度の真空中において 10^{-4} Pa 程度が要求される¹⁾。

前報において、複数の奥行きの深いスリットを対向させた配置、または、ギャップの十分小さな円形スリットの使用により、上記ガスシートターゲットを生成しうることをモンテカルロシミュレーションによって示した²⁾。

現在、奥行きの深いスリットを試作し、ガスシートターゲットとしての特性を評価中であるが、今回、本スリットにより生成されたガスシートを用いて電子ビームの検出を行うことにより、ガスシートモニターの有効性を示すことができたので、その概要を報告する。

2. ガスシートの生成

ガスシート発生装置を模式的に Fig. 1 に示す。基本的な構成物は、奥行きの深いスリットと形状成形用の薄いスリットである。幅50 mm、奥行き100 mm、隙間0.15 mmの奥行きの深いスリットにガスを通すことにより生成されたガスシートは、さらに、60 mm×0.3 mmのスリットで成形されて真空槽に導入される。奥行きの深いスリット構造は、2枚の SUS304 直方体を密着させて形成する。すなわち、1枚は完全な平面とし、もう1枚の SUS 板上に上記形状の溝を刻

Fig. 1 Schematic of the gas sheet generator. It consists of the deep slit for generating a gas sheet and the thin slit that is placed on the cover for differential pumping. The deep slit, which is formed between 2 SUS304 plates, has a length of 50 mm, a breadth of 0.15 mm, and a depth of 100 mm. The thin slit that controls the thickness of the gas sheet has a length of 60 mm and a breadth of 0.3 mm. The origin of the coordinates, O-xyz, is placed at the center of the exit plane of the deep slit.

んで、2枚を密着させる。さらに、スリットを刻んでいる SUS 板には、ガス溜を設けてある。形状成形用スリットは、背圧に対するガスシート濃度の比を高めるために導入した差動排気用カバーの先端に設けられている。

なお、Fig. 1 には、以下の議論に用いるため、O-xyz 座標系を示してある。すなわち、奥行きの深いスリットのガス放出面中央に原点 O を、ガスの流れる方向に x 軸、スリットの長辺方向に y 軸、短辺方向に z 軸をとる。

差動排気用カバーを取り付けた状態で、ガスシートの特性を評価した。ここでは、その概要を述べる。測定には、残留

* 平成27年12月1日 第56回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)

ガス分析器を検出器とするフラックスモニターを用いた。本モニターの先端には細いスリットが設けられている。形状は、長辺10 mm、短辺0.2 mm、厚みは0.12 mmである。このスリットをガスシート生成用スリットに平行に(すなわち、 yz 平面に平行に)、かつ、長辺および短辺同士を平行にした状態で移動させる。こうすることで、ガスシートの厚み方向(z 軸方向)の濃度分布を精度よく測定することができる。

Ar を導入した時のフラックスモニターによる Ar^+ 電流の測定例を Fig. 2 に示す。横軸は、フラックスモニター先端に設けられているスリットの中心の x, y 座標を直線 $(x, y) = (100, 0)$ (mm) 上に拘束した状態での z 座標を示す。ここでは、ガス導入部(ガス溜)の Ar 圧力をパラメータとす

Fig. 2 (Color online) The change in the Ar^+ current as a function of z value of the center of the probe head for the flux monitoring with a mass filter. The parameter is the Ar pressure P_{Ar} in the gas reservoir of the deep slit (see Fig. 1). The coordinate system O-xyz is the same as that in Fig. 1.

る変化を示してある。本図から、流量によらず、形成されるガスシートの厚みは、半値幅で 1.5 ± 0.2 mm であることがわかる。また、当然ながら、流量が増すにつれガスシート濃度も高くなることがわかる。フラックスモニターによる濃度測定については、現在、評価中であり、近々報告するが、後述するように、ガス導入部圧力が100 Pa程度で、ガス放出面から直上85 mmの位置で、凡そ 2×10^{-4} Paの圧力に相当する濃度のガスシートが形成されている。

3. 電子ビームの検出実験

3.1 機器配置

上述の発生装置により形成されるガスシートを用いて電子ビームの位置および断面形状を求める実験を行った。概念を Fig. 3 に示す。超高真空中で、上述のガスシートと電子ビームを交差させ、生じたイオンをイオンリペラーおよび補助電極を用いてマルチチャンネルプレート (MCP) に導く。イオンによって生じた2次電子はMCPにより増幅され、蛍光面に投影される。その蛍光像を、石英窓を通して真空外から観測することにより電子ビームの情報を得る。

イオンリペラーと補助電極は、金網からなり、直径100 mmである。特に、補助電極は、イオンの透過性をよくするため、線径 $18.5 \mu\text{m}$ 、70メッシュのNi金網を使用している。MCPを保護しているシールドカバーは、直径105 mmの円筒で、MCPの有効径が30 mmであることから、先端部に直径32 mmの穴を設けてある。また、補助電極、シールドカバー、MCPは、それぞれ、2 mmの間隔で配置されている。なお、MCP、蛍光面および補助電極(シールドカバーを含む)を総称して、イオン検出系とよぶ。

イオンリペラーとイオン検出系は、軸をあわせた上で、電子ビームを挟んで対称に、かつ、電子ビームと軸が一点で交

Fig. 3 (Color online) The experimental layout for the electron-beam detection with the gas sheet. The multi-channel plate (MCP) and the fluorescent screen have the same rotational axis, which intersects the electron-beam perpendicularly at a point (called “beam center”) under the electric-field-free condition. The ion repeller has the same rotational axis and is placed on the opposite side of the electron beam. The supplementary electrode is used to correct the disturbance of the electric field because of the hole on the shield of the MCP. The gas sheet is orthogonal to the plane formed by the electron beam and the rotational axis of the MCP. Moreover, the sheet and the electron beam cross each other at a 29.5° angle.

差するようにする．イオン検出系と電子ビームまでの距離は30 mmを標準とする（なお、この交点を、今後、“ビーム中心”と呼ぶ）．ただし、ビームの軌道は電場のない状態のものとする．すなわち、イオン検出系を稼働させた場合の電子ビーム軌道と、電場のないときの軌道のずれ量は、ビーム中心付近で、最大0.7 mm程度である^{†1}．これは、微調整で修正可能な量であり、電場のない状態で、電子ビームと各電極間の位置調整を行えば十分である．

ガスシートについては、電子ビームとイオン検出系の軸が構成する平面と直交し、かつ、Fig. 1に示す x 軸がビーム中心を通るように配置する．また、ガスシートと各電極が干渉するのを防ぐため、電子ビームとガスシートのなす角を 29.5° に設定した．ビーム中心から奥行き深いスリットのガス放出面までの距離は85 mmに設定した．

3.2 電子ビーム

電子ビームは、株式会社オメガトロン製の電子銃OMS-3040EFCより供給される．最大加速電圧30 kV、最大電子電流3 mAである．今回の実験では、加速電圧30 kV、電子電流 $2\sim 10\ \mu\text{A}$ で運転した．また、電子銃からビーム中心までは、340 mmで、電子電流はファラディカップにより常時モニターされる．

ビーム中心位置でのビーム径を評価するため、金属平板を一時的に追加し、イオン検出系の軸にそって、電子ビームを遮るように移動させたときのファラディカップ電流 I_F の変化を調べた．最もビームを絞った場合につき、結果をFig. 4に示す．横軸は、平板の（イオン検出系の軸上での）位置である． I_F の位置に関する変化率から、電子ビームの広がり、直径 $0.35\pm 0.05\ \text{mm}$ と評価できる．また、ビーム中心から電子ビーム軸にそって $\pm 15\ \text{mm}$ の範囲では、ビーム径は誤差の範囲内で一定であった．

3.3 ガスシートによる電子ビームの検出

観測例をFig. 5に示す．電子ビームの条件は、30 keV、 $5\ \mu\text{A}$ 、 $\phi 0.35\ \text{mm}$ である．ここでは導入ガスを N_2 とし、ガスシートの濃度は $1.8\times 10^{-4}\ \text{Pa}$ である^{†2}．およそ1600 l/sの排気速度で排気されている真空容器の圧力は、この時、 $9.6\times 10^{-6}\ \text{Pa}$ である．本図において右上部に明るく光る細長い輝点がガスシートと電子ビームの交差により生じたイオンによるものである．輝点が横長に出現するのは、厚み $\sim 1.5\ \text{mm}$ のガスシートを電子ビームが斜めに横切ることによることに起因している．また、薄く帯状に延びる軌跡は、電子ビームと雰囲気ガスの衝突によって生じたイオンによるものである．

輝点の縦幅は電子ビームの直径0.35 mmに対応し、横幅は、厚み（ $t\ \text{mm}$ ）のあるガスシートがビームに対して 29.5° 傾いていることに対応している．これから、ガスシートの厚みを求めると、 $t=1.75\pm 0.25\ \text{mm}$ と求まる．この値は、2章で述べた値（ $1.5\pm 0.2\ \text{mm}$ ）と良く一致している．

^{†1} イオンリペラーと補助電極（ともに直径 d ）の間隔を h 、両電極間の電位差を V とすると、加速電圧 V_a の電子ビームがこの電極間を通過するときの偏向量 R は、電極軸付近で、 $R\approx Vd^2/(16hV_a)$ となる．よって、 $V_a=30\ \text{kV}$ 、 $V=2\ \text{kV}$ 、 $d=100\ \text{mm}$ 、 $h=60\ \text{mm}$ より $R\approx 0.7\ \text{mm}$ を得る．

^{†2} ガスシートの濃度については、考察の項を参照のこと．

Fig. 4 The change in the current I_F via the Faraday cup as a function of the distance between the beam center and the edge of the cutoff plate, which is moved along the detector axis to interrupt the electron beam. From the difference analysis of the I_F cutoff profile for the plate position, the diameter of the electron beam is estimated to be $0.35\pm 0.05\ \text{mm}$.

Fig. 5 (Color online) A photograph of the fluorescent screen illuminated by the MCP during the electron beam detection experiment using a N_2 gas sheet. The bright cigar-shaped spot is caused by ions that are generated by the collision of the electron beam with the gas sheet. The electron beam has a diameter of 0.35 mm and a current of $5\ \mu\text{A}$. The gas sheet is estimated to be approximately 1.5 mm thick by considering the crossing angle of 29.5° with the electron beam.

また、輝点の明るさは、導入ガス量および電子電流と正の相関がある．さらに、この輝点は、電子ビームの位置を上下左右に移動させるに連動して動くこと、そして、焦点をぼかす操作に連動して太くなることが確認できている．

以上、ガスシートを用いて電子ビームの位置および形状をモニターしうることが明らかとなった．

4. 考 察

ここでは、電子ビームを利用したガスシートの濃度評価に

について述べる。

評価法は、以下の通り。電子ビームおよびイオン検出系の条件を変えずに、ガスシートと電子ビームの衝突地点(輝点)を蛍光板上に固定する。この固定点の輝度について、導入ガスが同一であれば、ガスシート由来であろうと、雰囲気由来であろうと、同一の輝度を与える場合には、同一のガス濃度としてよい。すなわち、ガスシートのない状態で、ある雰囲気圧力 P の時の上記固定点の輝度と、ガスシート単独で輝点を生じた際の輝度が同一であれば、その雰囲気圧力 P が、この時のガスシート濃度であるとしてよい。ただし、ガスシートを生成する際に背圧の変化があるので、背圧を加えた濃度に対して、補正を行う必要がある。実際に、背圧はガスシート濃度の1/10程度である。

このようにして得られたガスシート濃度を、Fig. 1 に示すガス溜の圧力の関数として、Fig. 6 に示す。これから、当初目標としていたガスシート濃度が、ほぼ達成されていることが確認できる。なお、ここに示すデータは、 N_2 ガスに対するものである。

上述の手法は、フラックスモニターのような専用機器を使用する必要がない点で、実機運転・調整時におけるガスシートの評価に適しているといえる。

5. ま と め

大強度陽子ビームを非破壊で診断するための計測器を実現するための基幹要素としてガスシート発生技術の開発を行っているところであるが、今回、奥行き深いスリットを試作し、本スリットにより生成されたガスシートを用いて電子ビームの検出を試みた。

まず、幅50 mm、奥行き100 mm、隙間0.15 mm の奥行きの深いスリットと60 mm×0.3 mm の成形用スリットを組み合わせるにより、ガス放出面から直上85 mm の位置で、厚みが1.5 mm で、濃度が 2×10^{-4} Pa 程度の圧力に相当するガスシートを作成した。

次いで、上記ガスシートと30 keV 電子ビームを交差さ

Fig. 6 The change in the density of the gas sheet as a function of the N_2 pressure (P_{N_2}) in the gas reservoir of the deep slit. The density is estimated from the light intensity of the bright spot on the fluorescent screen. In fact, the intensity of this spot, which originated from the ions generated by the collision of the gas sheet with the electron beam, is compared with the intensity at the same place on the screen generated by the ions of a of uniformly distributed gas colliding with the beam.

せ、衝突によって生じたイオンをマルチチャンネルプレートにて増幅し、蛍光面上の像として観測した。その結果、電子ビームの位置および断面形状をモニターしうることを確認した。

今後、ガスシートの大型化および濃度の均一化等、実用化に向けた技術開発をすすめる予定である。

〔文 献〕

- 1) Y. Hashimoto, T. Fujisawa, T. Morimoto, Y. Fujita, T. Honma, S. Muto, K. Noda, Y. Sato and S. Yamada: Nucl. Instrum. Method A, **527** (2004) 289.
- 2) N. Ogiwara: J. Vac. Soc. Jpn., **56** (2013) 146.