

Optimization of an O₂ sheet beam focusing-system for sheet beam profile monitor

H.Uchiyama^a, T.Fujisawa^b, Y.Hashimoto^c, K.Noda^b

^aGraduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inageku, Chiba 263-8522, Japan

^bNational Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inageku, Chiba 263-8555, Japan

^cHigh Energy Accelerator Research Organization, Oho1-1, Tukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

A non-destructive 2-D ion beam profile monitor using an oxygen molecular sheet beam has been developed. In this profile monitor, a method of using multi-pole magnets to focus an O₂ beam was adopted to gain a thin and highly dense sheet beam. At the present, this monitor has been installed in HIMAC synchrotron, and we have succeeded in measuring the profile of a circulating ion beam. This paper describes characteristics of the sheet beam, and shows measured profile of an ion beam circulating in HIMAC.

1 はじめに

加速器の発展において、非破壊でのビームプロファイル測定は大変重要であり、これまでも多くのプロファイルモニターが開発されてきた[1]。Sheet Beam Profile Monitor (SBPM)[2]は、2次元のビームプロファイルを得られるという特徴があり、また、短時間での測定が可能で、周回中のイオンビームへ与える影響も小さいという特性を持ったビームプロファイルモニターである。図1にSBPMの概念図を示す。

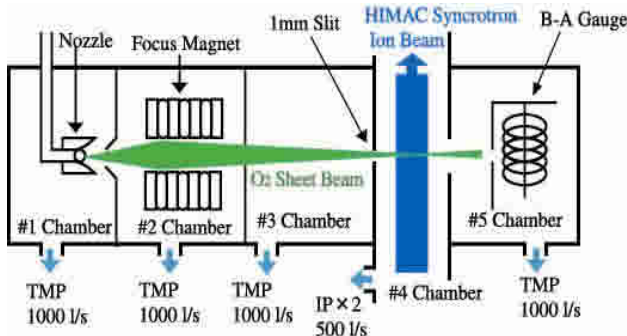


図1：SBPM全体図

(TMP:Turbo-molecular pump, IP:Ion pump)

SBPMは、シート状のガスターゲット中に加速イオンビームを通過させ、生成した電離イオンを平行電場によって収集し、MCP(Multi Channel Plate)で増幅する。その後、スクリーンを光らせ、それを、CCDカメラで観測することでイオンビームのプロファイルを得る方式になっている。SBPMでは2次元でのビームプロファイルを観測するためにイオンビームに対してガスシートを45度傾けている。そのため、イオンビームプロファイルの垂直方向の解像度がガスシートの厚さに大きく影響を受ける。そこで、ガスシートには十分な薄さが求められる。さらに、短い時間(数100 ns)での測定において、測定の精度を高めるためガスの密度を高くする必要がある。この目的で、酸素分子が不均一磁場中を通過すると偏向することを利用し、 $S \cdot N$ を交互に並べた多重極磁石で作った不均一磁場によりガス

シートをシートの厚さ方向に収束させて、薄く密度の高いガスシートビームを得ている。さらに、リングの超高真空へ与える影響をできる限り少なくするため、本装置ではパルス状の酸素分子ビームを用いている。

本SBPMは、HIMACシンクロトロンに設置し、ガスシートビーム収束系の最適化及び、プロファイル測定を行った。ここではその結果について報告する。

2 軌道計算による磁石最適化予測

磁束密度 B の磁場中では、スピンを持った粒子はラーモアの歳差運動をしながら、磁場に沿ってスピンの向きを変える。ラーモアの周波数 ν は、磁気回転比 (g ファクター) を g 、ボーア磁子を μ 、プランク定数を h とすると、

$$\nu = g \mu B / h \quad (1)$$

となり、1Tの磁場では約28GHzである。この装置の磁石の磁極先端の磁束密度はおよそ2.3Tで、磁極間隔は6mm、ガスの速度は735m/sなので[3]、スピンは磁場に沿って向きを変える。また、スピンの z 成分を m とし、 g と m が磁場から独立であれば、この磁気モーメントが不均一磁場中で受ける力 F は

$$F = -g \mu m \cdot \text{grad}|B| \quad (2)$$

である。そのため、 B の勾配が磁場に沿った向きで磁場中心からの距離に比例していれば、シートビームを一定距離に収束させることができる。

酸素分子は2原子分子であるため、スピンだけではなく回転による角運動量を考える必要がある。酸素のスピンは1であるので、回転の角運動量 $k=1$ のときの全角運動量 J は $J=1, 2, 0$ の3つあり、磁場中ではゼーマン分裂によって、エネルギー準位 M がそれぞれ、 $J=1$ のとき $M=1, 0, -1$ 、 $J=2$ のとき $M=2, 1, 0, -1, -2$ 、 $J=0$ のとき $M=0$ 、に分裂する。 $M=2, -2$ のエネルギーは(2)の $m=1, -1$ にほぼ等しく、 $M=1, -1$ はその半分である[4,5]。そこで、不均一磁場の中で発散する成分、直進する成分があり、収束する成分も J により受ける力が違うことを考慮に入れて計算を行わなければならない。 $k>1$ の場合は、さらに多くのエネルギー準位に分裂するため各成分の収束力に大きく差ができる。また焦点距離は、ガスの速度の2乗に比例して増加する。そのため、ガスの温度が高くなり、速度のばらつきが大きく、 $k>1$ となるような場合には、十分な収束力は見込めなくなってしまう。軌道計算では、実際に集束磁石の作る磁場分布を測定した結果から dB/dy を算出し、シートビームの温度を7K以下としたときの酸素分子の軌道を計算した。 $M=2$ の場合は、図2のような焦点距離と磁石ギャップの関係を得た。

HIMACに設置されたSBPMは、HIMACの超高真空への影響を少なくし、同時にシートビームの厚さ方向の広が

りを制限するために、#3 チェンバーと HIMAC チェンバー(#4)との間に高さ 1mm(図 1)のスリットを入れてあり、測定部での発散する成分と直進する成分の厚さはこのスリットで決定される。またこのスリットのために、イオンビームプロファイル測定部でのシートビームの流量が大きくなるのは、収束の焦点位置がスリットに一致したときである。収束成分は測定部でオーバーフォーカスになるため、厚さ方向に広がりを持つ。このためシートビームの厚さは、このオーバーフォーカスした成分によって決まる。軌道計算は、このスリットを考慮に入れて行い、磁石の設置位置と磁石ギャップの最適条件を考察した。

その結果、流量が最も多くなる磁石ギャップは、磁石を下流側(図 1, #3chamber)に設置した場合はギャップ 12mm、磁石を上流側(図 1, #2chamber)に設置したときはギャップ 10.5mm(図 3,5)という結果を得た。また磁石の設置位置を比較すると、磁石を上流に設置しギャップを 11mm とした場合の流量は収束磁石無しときの約 3.7 倍になり、下流設置でギャップ 12mm のときの約 2 倍より多くなるという結果を得た。さらに、同じ条件で、モニターチェンバー中心において、収束力を受けない成分の厚みは 1.2mm 以内であり、オーバーフォーカスした成分のうち厚さ 1mm 以内にあるのは、磁石下流設置では約 67%、上流設置では約 85% であるという結果を得た。以上から集束磁石の最適設置条件は磁石ギャップ 10.5mm で#2 チェンバー設置であるという予想した。

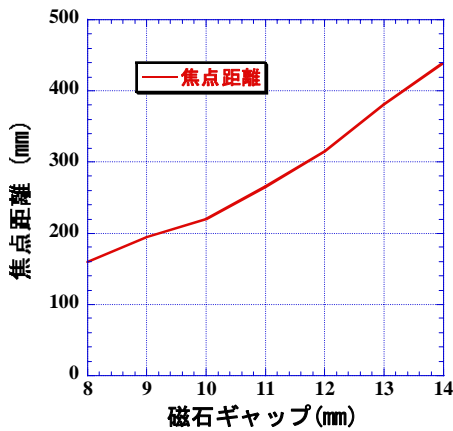


図 2 : M=2 の成分の焦点距離の計算結果 - 平均の焦点距離

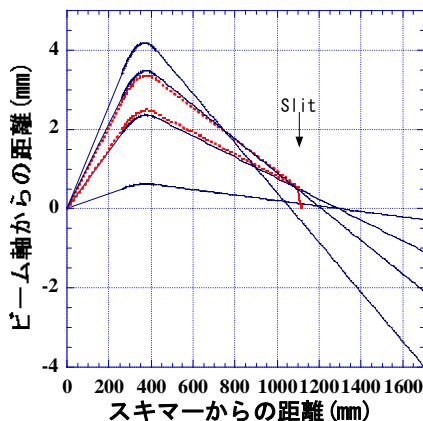


図 3 : 磁石#2 チェンバー設置での M=2 の成分のビーム軌道計算(磁石ギャップ 11mm)

3 測定

3.1 測定方法

シートビーム密度測定装置は、1mm(h)×14mm(w)のスリット付き B-A ゲージ(Bayard-Alpert Gauge : 図 1)を用いて行った。図 4 の測定結果はシートビームの密度時間分布測定をしたものである。分布の立ち上がり早いことから、酸素分子の速度がよく揃っていると考えられる。このことから、シートビームの温度は十分低いという仮定が正しいことが確認された。また、シートビームの密度分布プロファイルを、ゲージを移動させることで測定した。

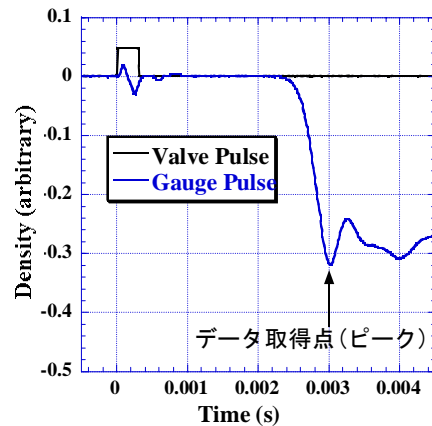


図 4 : シートビーム時間分布

3.2 磁石軸アライメント

モニターチェンバー(#4)前に高さ 1mm のスリットが置かれているので、スリット下流の流量を最大にするためには、磁場の中心軸とスリット系の軸を一致させる必要がある。そこで、磁石のギャップを変えずに軸をずらしてスリット下流の流量を調べた。その結果、磁石中心軸の初期設定はスリットの軸から 0.16mm ずれていることが判った。

3.3 シートビーム厚さプロファイル測定

実際のシートビーム流量測定結果を図 5 に示す。磁石ギャップ 10mm のときに流量が最大になっており、計算結果とよく合う。しかし、計算では M=2 の成分によるピークと、M=1 の成分によるピークの二つのピークが見られるが、磁石ギャップ 6mm 以上の測定では、M=1 によるピークが見られない。この原因の解明は今後の課題である。

また、シートビームの厚さ方向プロファイル測定結果を図 6 に示す。これより、シートの厚みは#3-#4 間スリットによりほぼ決まっていることがわかる。また、計算結果から予想したように磁石を上流側設置にした場合、下流側設置に比べて集束成分のオーバーフォーカスによるシートの厚さ方向の広がりが少ないことも確認できた。以上の結果より、HIMAC における磁石の最適設置条件は上流設置で磁石ギャップ 10mm であると決定した。

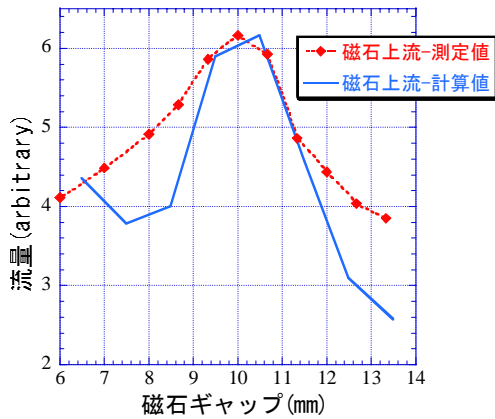


図 5 : シートビーム流量測定結果の計算値との比較(磁石上流設置)

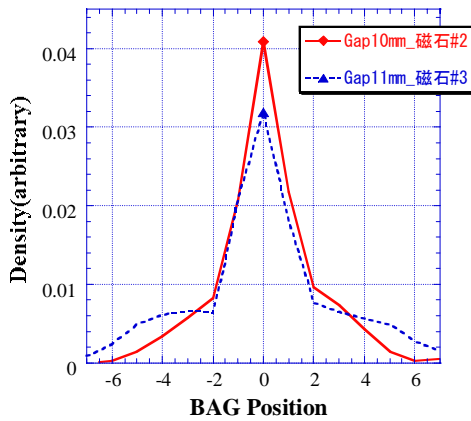


図 6 : 磁石#3 チェンバー設置でのシートビーム厚さ方向プロフィール(磁石上流設置で磁石ギャップ 10mm と下流設置でギャップ 11mm)

3.4 シートビーム水平方向プロフィール測定

3.3 ではシートビームの厚さ方向の分布を測定したが、水平方向に関して密度分布の均一性を調べる測定を行った。この測定では、覆いの下側からのガスの影響を防ぐために、ゲージ全体を覆い測定を行った。その結果図7のような結果を得た。これより、シートビームは水平方向に均一に分布していることが確認された。

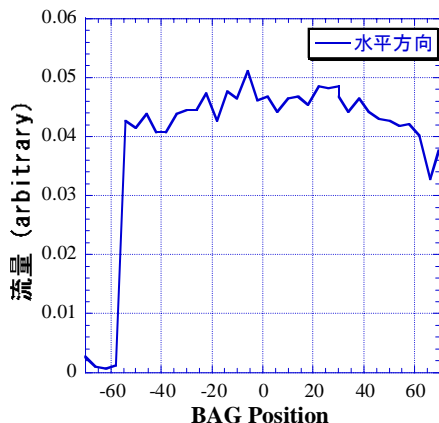


図 7 : シートビーム水平方向プロフィール

4 イオンビームプロフィール測定

以上の測定から決定した条件で HIMAC のイオンビームのプロフィール測定を行った。図 8 は、6MeV/n の $^{40}\text{Ar}^{18+}$ ビームの電子冷却の過程を測定し、得られた像である。[6]

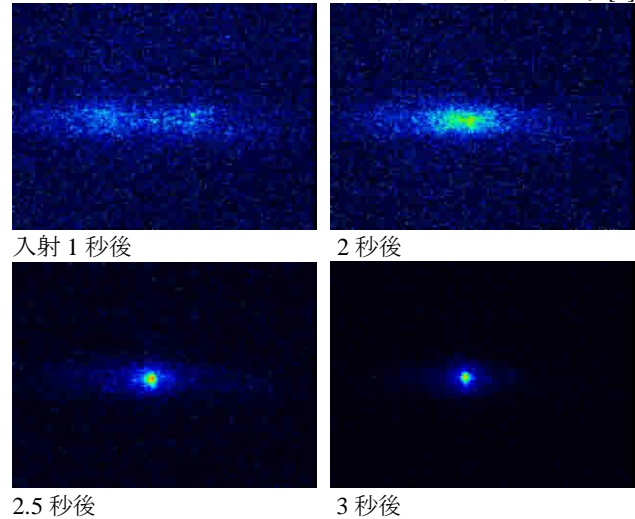


図 8 : $^{40}\text{Ar}^{18+}$ ビームの電子冷却の過程

5 まとめ

実際に測定した磁場データから酸素分子の軌道計算を行った結果、集束磁石は、#2 チェンバーに設置し、磁石ギャップは 10mm が最適であるという予想を得、実際の測定結果から、最適磁石ギャップは 10mm であるという結果を得た。また、磁場の軸とスリット系の軸の一致、シートビームの水平方向密度の均一性を確認し、最終的には実際に周回中のイオンビームのプロフィール測定に成功した。

謝辞

この研究は放射線医学総合研究所 HIMAC 共同利用研究として行いました。本研究を行うにあたり多くの御指導、御協力を頂きました HIMAC 関係者及び AEC の皆様に深く感謝します。

参考文献

- [1] T.Honma, D.Ohsawa, K.Noda, T.Iwashima, H.Y.Ogawa, Y.Sano, E.Takada, S.Yamada, NIM A 490 (2002) 435-443
- [2] Y.Hashimoto, Y.Fujita, T.Morimoto, T.Fujisawa, et. al., Proc. EPAC, Paris(2002)p.1900
- [3] D.R.miller, in: Giacinto Scoles (Ed.), Atomic and Molecular Beam Methods, Vol.1, New York, Oxford Press, 1988,p.14.
- [4] T.Fujisawa, Y.Hashimoto, T.Morimoto, Y.Fujita, NIM A 506 (2003) p.50
- [5] M.Tinkham, MIT, Ph.D Thesis, 1954.
- [6] 橋本義徳他、平成 14 年度粒子線癌治療用加速器に関する報告書