

Oxygen Gas-Sheet Beam Profile Monitor for the Synchrotron and Storage Ring

Yoshinori Hashimoto^{1,A)}, Takashi Fujisawa^{B)}, Teruhisa Morimoto^{A)}, Yuzo Fujita^{A)},
Toshihiro Honma^{B)}, Suguru Muto^{A)}, Koji Noda^{B)}, Yukio Sato^{B)},
Tomonori Uesugi^{B)}, Satoru Yamada^{B)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801

^{B)}National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

4-9-1 Anagawa, Inage-ku Chiba-shi, Chiba 263-8555

Abstract

A fast, non-destructive beam-profile monitor^[1,2] was developed using an oxygen gas-sheet target in the HIMAC synchrotron^[3]. The size of the gas-sheet target was 85 mm in width and 1.3 mm in thickness, of which the density was 1×10^{-4} Pa. The base vacuum in the ring was not deteriorated by this gas-sheet target, and was on the order of 10^{-8} Pa. In typical cases, carbon ion beams are accelerated from 6 to 290-430 MeV/n for cancer therapy, in which the intensity is 2.5×10^8 particles/bunch. For these beams, two-dimensional beam profiles were successfully measured within the time (~ 100 ns) of the bunch separation. This article describes both the technical and physical aspects of the monitor together with some results.

酸素分子ガスシートを用いたビームプロファイルモニター

1. 概要

年々高精度化しているイオンシンクロトロンでのビームオペレーションとビームダイナミクスの研究から、非破壊型の高速のビーム診断ツールへの要求が高まっている。しかし、高速のビームプロファイル計測を、特にHIMAC^[3]のようなビーム強度が低くかつ超高真空領域となるシンクロトロンで行うことは、従来の残留ガスモニター^[4]ではイオン対発生数が少なく、計測時間に10ms以上を要し困難である。

この克服のために、ガスターゲットを用いて電離イオン数を増やすアイデアが、CERNのISRやLEARで、ナトリウムやカーボンを用いて実現された^[5,6]。それらは、高い電離イオン効率を有したが、例えばバンチ時間程度の高速の検出器ではなかった。私たちは、二次元実像ビームプロファイルをいかに高速に計測できるかに本開発のポイントを絞った。

ガスターゲット密度を十分に高く、かつモニターサイズをコンパクトにするために、ノズルビーム法^[7]をパルス化して採用した。高速検出を行うために、2段構成のマイクロチャンネルプレート(MCP)とイメージングスクリーンを用いて、電離イオンを電荷増幅して映像化し、それをイメージインテンシファイアチューブ(IIT)を付けたCCDカメラで計測した。さらに、酸素分子線を用い、不均一多極磁場をその磁気モーメントに作用させる収束装置を開発し、ターゲット密度を2倍に向上させた^[8]。

2. 分子線発生装置

図1に、酸素分子ガスシート発生装置の概念図を

示す。装置は5室の真空差動排気系で構成され、各室1000 l/sのポンプをもつ。酸素分子ビームは、gas-jet chamber内のノズルとスキマーで120 μ sのパルスで出射され、最終段のdetector chamberに向かって走る。ノズルからターゲット中心までの距離は1230 mmであり、走行時間約1.7 msを要する。

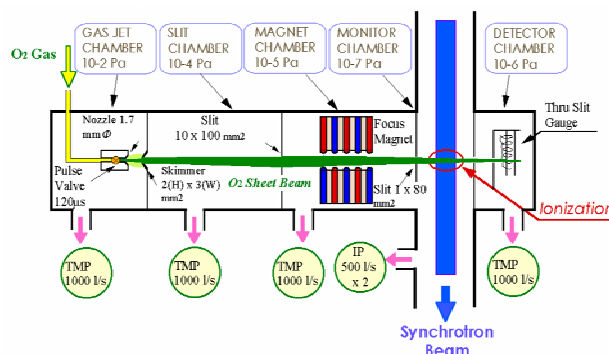


図1. 酸素分子ガスシート発生装置.

分子線はノズルビーム法で発生させる。0.6 MPa程度の高圧酸素ガスを、1.7 mm ϕ のノズルから真空中に放出し、断熱自由膨張を生じさせる。ノズル直後では、高い頻度の分子同士の衝突により、分子は冷却されると共に運動量が揃い、ノズル中心からほぼ等方的な運動方向をもつ分子線となる。この自由膨張領域内に、分子線中心部以外の不要分子を剥ぎ取る目的でスキマー(開口サイズ: $2.0^H \times 3.0^W$ mm²)を置く。生成された酸素分子線は、735 m/sの終端速度をもち、分子温度は、10 K程度となる^[1,7]。

次室のSlit chamberでは、発散する不要な分子

¹ E-mail: yoshinori.hashimoto@kek.jp

線をスリットでカットする。酸素分子線は、次の磁石での収束と併せてシート状に成形される。

Magnet-chamberでの収束は、酸素分子が、2 bohr-magneton の磁気モーメントをもちスピンの1であることを利用している^[8]。磁場勾配をもつ多極磁石(図2)は、Nd-Fe-Bの永久磁石 (remanent Br, 1.28 T; max. BH product, 318 kJ/m³) と高透磁率磁性体パーメンジュール (saturation Bs, 2.3 T) で構成され、磁極対数17, 分子線進行方向の磁石長159mm, 奥行70 mm である。収束力の調整のため、鉛直方向の磁極間隔は4~15mm まで大気側から変えることができる。磁極間隔12 mm の場合に、焦点距離260 mm となり、ターゲット密度を2倍に向上させることができる^[8]。

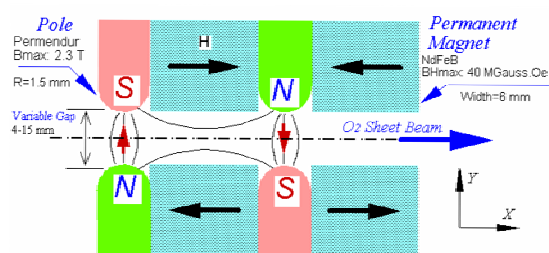


図2. 多極磁石を用いた収束磁石

ターゲットの特性測定は、HIMACへのインストール前に、スリット (15^w×0.5^H mm²) を前面につけたBA ゲージで行った。ターゲット厚みは、最大ガス密度となる磁石条件で1.3 mm (FWHM)であった^[1]。ターゲットは仰角45度をもつため(図4)、シンクロトロンビームから見た実効厚みは、1/cos45 した1.84 mm となる。ガス圧0.6 MPa の時、ターゲット密度は、1.0 × 10⁻⁴ Paで最大となった^[1, 2]。ガスシートの幅方向空間密度分布 (図3) は、全幅85mmで、約60 mmの平坦部を有する。

ガスシートを発生させるとmonitor chamber (リング)の圧力は、3×10⁻⁸ から7×10⁻⁷ Pa まで上昇する。これは分子線発生装置で引ききれないガスが遅れて流入してくるためであり、この圧力変化は、100msで回復する。この間リング上下流5mの地点での圧力変化は全く生じていない。2台のイオンポンプが有効に機能しているためと考えられる。

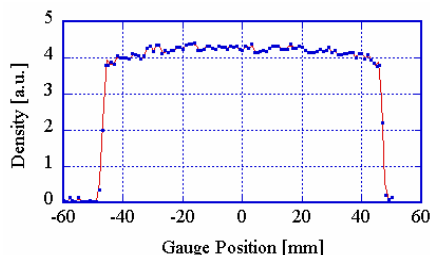


図3. ガスシートターゲットの幅方向の空間分布

3. ビームプロファイル計測装置

図4に検出系の概念図を示す。シンクロトロンビームとの衝突で発生する酸素イオン収集の電場は、

ステンレス製のイオン収集電極[外径:230 mmΦ, 間隔:70 mm]に、上下-/+4.5kV 程度の電圧を印加して、作られる。MAFIAの計算による検出位置のズレは、MCPの有効径100 mmφのうち、中央部の70 mmφの範囲で0.1 mm 以下、最外部で0.3 mm である。また、この電場によるシンクロトロンビームへのキックの補正のため、リングの上下流それぞれ350 mm 離れた位置に、補正電極が設置されている (図4)。

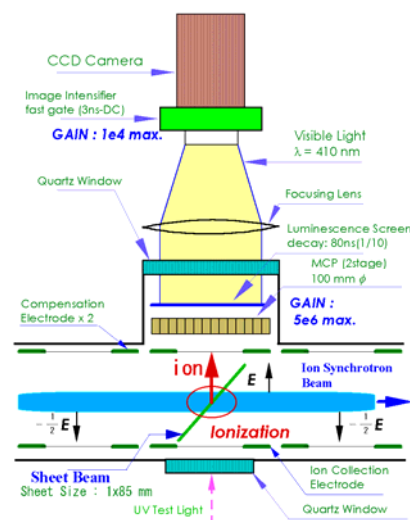


図4. ビームプロファイル検出装置

2段構成のMCP (浜松ホトニクスF2395-24PX, 最大印加電圧/ゲイン: DC 2kV/5×10⁶) では、有効径100mmφで到達した酸素イオンの荷電増幅を行う。MCP出口のスクリーン(発光波長:410nm)では、MCPから出射される電子によりビーム像を映像化する。単バンチ時間内 (HIMACのバンチ間隔:125 ns-1μs)での計測のため、スクリーンの光強度の減衰時間 (光量が1/10になるまで) は80 nsと短いものを選んだ。

より正確なビーム計測のため、検出器鉛直下方から、よくコリメートされた紫外光 (波長~200nm) をMCP全面にスイープ照射し、検出器の感度分布を測り、その値でビームプロファイルが補正される。

スクリーンのビーム像は、大気側に設置されたIIT (浜松ホトニクスC2925, 最大ゲイン: 1×10⁴, 時間ゲート: 3ns-DC) を付けたCCD カメラでビームに同期して検出される (図4)。

この高感度な検出系の増幅率は、MCPゲインが 1×10⁵ の時、MCPでの一つの二次電子が、IITの光電面で600 光電子となると見積もっている^[1]。

検出限界と直線性の試験^[1, 2]は、開発段階にNIRS-930サイクロトロン(8 MeV取り出し陽子ビーム(電流:3μA, FWHMサイズ:4.5 mmφ))を用いて行った。クリアなビーム像は、20μs (IITゲート時間)までであり、それより短い時間では、まばらな星状の像となった。Bethe-Bloch formula を用いて、このとき生成されたイオン対のflux densityを見積もると 2.9 × 10⁵ ions/mm²/sであり、イオン対数は約100であった。この値が検出限界を示す一つの目安となる。

検出器のダイナミックレンジは、ビーム電流50-

3000nA の範囲で、IITゲート時間20 μ s で20回の平均を計測した(図5)．直線性はきわめて良好であり、固定ゲインのダイナミックレンジは約60であった．

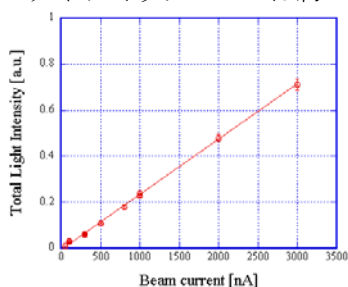


図5. 8 MeV陽子ビームの強度と計測された光量

検出器の分解能は、HIMACの電子冷却で非常に細く絞った6MeV/u のAr¹⁸⁺ ビームを用いて評価した^[1,2]．水平方向で0.76 mm, 垂直方向で1.51mm のサイズまで計測することができた．垂直方向は、ターゲットの厚みの影響で大きいと考えられる．

4. ビームプロファイル計測

4.1 加速ビーム

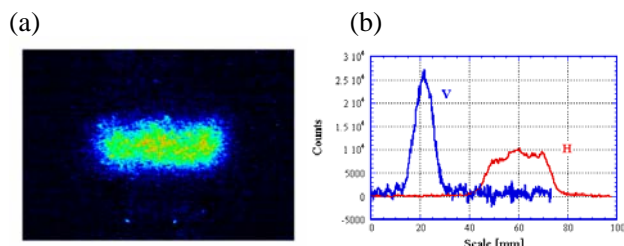


図6. ¹²C⁶⁺の単バンチのビームプロファイル

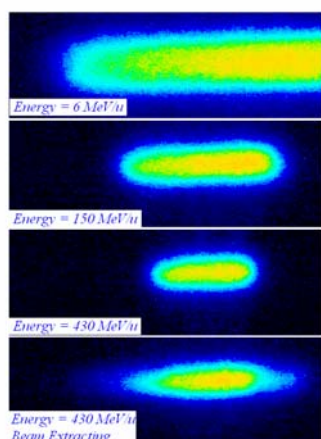


図7. 入射から取り出しまでの¹²C⁶⁺の加速ビーム

2002年5月からHIMACでのビーム計測を開始した．まずHIMACで通常のガン治療に用いられる¹²C⁶⁺ビームで、エネルギー350 MeV/u , バンチあたりの粒子数 2.5×10^8 の時、バンチ間隔よりも十分に短い100ns のIITゲート時間で、クリアな二次元ビーム像

を計測することができた(図6(a))．図6(b)には、水平、垂直方向への射影を示す．また同条件で、入射から取り出しまで(6-430 MeV/u) 10回平均で計測した．図7に示す様に加速中の断熱減衰、取り出し時の様子を見る事ができた．

4.2 電子冷却^[9,10]された重イオンビーム

エネルギー6 MeV/u のAr¹⁸⁺ コースティングビーム(粒子数 1×10^6)の電子冷却過程を、IITゲート時間100 μ sで計測した．プロファイルとその射影を、それぞれ図8(a), (b)に示す．3s 後には、ビームはよく冷却され、水平、垂直方向のサイズは、それぞれ、1.82, 2.20 mm まで小さくなった．

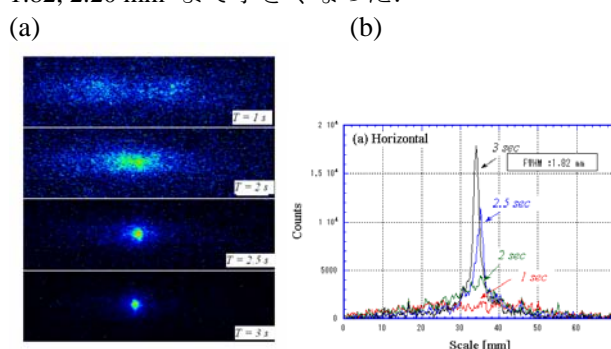


図8. 6 MeV/u のAr¹⁸⁺ (粒子数 1×10^6)の電子冷却

ガスターゲットのビームへの影響として、散乱や荷電変換などが考えられるため、静電モニターのショットキー信号の周回周波数スペクトラムを詳細に調べたが、有意な変化は観測されなかった．

5. まとめ

HIMACにおいて、酸素分子ガスターゲットを用いた高速非破壊型ビームプロファイルモニターを開発した．HIMAC の典型的なガン治療ビームである¹²C⁶⁺(強度: 2.5×10^8 ppb)で、エネルギー6-430 MeV/u の時、二次元実ビーム像のバンチ間隔時間内100 nsでの計測に成功した．電子冷却されたAr¹⁸⁺の冷却過程もクリアに計測することができた．

参考文献

- [1] Y. Hashimoto, et al., Nucl. Instr. and Meth. A527(2004)289.
- [2] 橋本義徳 他, 加速器学会誌, Vol. 1, No. 3, 2004, p. 216-224
- [3] S. Yamada, Proc. of 2nd APAC, Beijing, 2001, p. 829-834.
- [4] T. Honma, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 490 (2002) 435.
- [5] B. Vosicki, et al., IEEE Trans., NS-22 (1975) 1475.
- [6] R. Galiana, et al., Proc. of PAC, USA, 1991, p. 1198-1200.
- [7] D. R. Miller, "Atomic and Molecular Beam Methods, Volume 1", Edited by Giacinto Scoles, New York, Oxford Press, (1988) p.14.
- [8] T. Fujisawa, Y. Hashimoto, T. Morimoto, Y. Fujita, Nucl. Instr. and Meth. A 506 (2003)50-59.
- [9] K. Noda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A441(2000) 159-166.
- [10] K. Noda, et al., Proc. of 8th EPAC, Paris, 2002, p.1380-1382.