

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

橋本 義徳^{*1}・藤澤 高志^{*2}・森本 照久^{*1}・藤田 雄三^{*1}・本間 壽廣^{*2}
 武藤 豪^{*1}・野田 耕司^{*2}・佐藤 幸夫^{*2}・上杉 智教^{*2}・山田 聡^{*2}

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

Yoshinori HASHIMOTO^{*1}, Takashi FUJISAWA^{*2}, Teruhisa MORIMOTO^{*1}, Yuzo FUJITA^{*1},
 Toshihiro HONMA^{*2}, Suguru MUTO^{*1}, Koji NODA^{*2}, Yukio SATO^{*2},
 Tomonori UESUGI^{*2} and Satoru YAMADA^{*2}

Abstract

A fast, non-destructive beam-profile monitor was developed using an oxygen gas-sheet target in the HIMAC synchrotron. 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.

HIMAC シンクロトロンにおいて、酸素分子ガスシートターゲットを用いた非破壊型のビームプロファイルモニターを開発した¹⁾。ガスシートターゲットのサイズは、85 mm 幅、厚み 1.3 mm (FWHM)、その密度は、 1×10^{-4} Pa である。HIMAC シンクロトロンのベース真空度は 10^{-8} Pa 台であるが、このガスシートターゲットによつての悪化はほとんどない。典型的なケースであるがん治療に用いるカーボンビーム (バンチあたりのビーム強度: 2.5×10^8) の入射 6 MeV/n から 430 MeV の通常加速範囲で、バンチ間隔時間内の 100 nsec という短い時間で、二次元の実像ビームプロファイルの計測に成功した。

1. 概 要

年々高精度化しているイオンシンクロトロンにおける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は、特に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 シンクロトロン²⁾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やストレージリングで行うことは次に述べるよう

に難しい。HIMAC シンクロトロンでは、H~Xe までのイオン種を加速し、取出している。その入射エネルギーは、6 MeV/n で最大の取りだしエネルギーは、800 MeV/n である。ガン治療で用いる $^{12}\text{C}^{6+}$ ビームのエネルギーである 430 MeV/n は、人体照射の場合のレンジ 30 cm を想定している。最大の $^{12}\text{C}^{6+}$ のバンチあたりのビーム強度は、ハーモニック数 4 のとき、 1.7×10^9 ppb である。また加速器内の平均圧力は、 1×10^{-8} Pa である。このような超高真空領域では、従来の残留ガスモニターでは、イオンペアの発生数が少ないために意味のあるビームプロファイルを計測するのに 10 ms またはそれ以上の時間を要する³⁾。

この困難の克服のために、ガスターゲットを用いて電離イオン数を増すアイデアが導入された。CERN の ISR や LEAR では、ナトリウムやカーボンを用いたガスターゲットが使用された^{4,5)}。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。ノボシビルスクでは、マグネシウムジェットが使用されている^{6,7)}が、ペンシル型分子線を空間スイープするもので、計測時間を高速化する仕様ではない。私たちは、二次元実像ビーム

*1 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) High Energy Accelerator Research Organization
 (E-mail: yoshinori.hashimoto@kek.jp)

*2 放射線医学総合研究所 (NIRS) National Institute of Radiological Sciences

プロファイルをいかに高速に計測できるかに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、かつモニターをコンパクトにするために、パルス化したシンプルなガス発生法であるノズルビーム法⁸⁾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、電離イオンの電荷を増幅して映像化し、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 カメラで計測する高感度の検出器系を構築した。さらに、ガス種に酸素分子を用い、不均一磁場をその磁気モーメントに作用させるガスシートの収束装置を開発し、ターゲット密度を2倍に向上させた⁸⁾。

2. モニター概略

図1, 2に、酸素分子ガスシートビームプロファイルモニターの概念図と装置写真をそれぞれ示す。装置は、5つの真空チャンバーからなる差動排気系で構成されており、衝突点の Monitor Chamber には2台のイオンポンプ (500 l/s) が、他の各チャンバーにはターボ分子ポンプ (1000 l/s) が付けられている。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 のパルスとして出射され、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。途中の Slit chamber は、発散する不要なビームをスリットによりカットし、Magnet

chamber では、周期的な磁極構成をもつ磁石により、ターゲット地点に酸素分子シートビームを収束し、ターゲット密度を増強させる。酸素分子ビームは、この収束と併せて、スキマーを含めた3種類のスリットを通過することで、シート状に成形される。Monitor chamber では、シートビームは、シンクロ



図2 装置写真。左手に見える円筒形が gas-jet chamber であり、次が slit-, magnet-chamber (矩形) である。このとき、収束磁石は slit chamber に収められている。Monitor chamber は HIMAC シンクロトロンリングの一部であり、シンクロトロンビームは、写真の後方より右手に見えるダクトを通過して走る。Monitor chamber 上に垂直に立つ黒いポストスタンドには、カメラと光学系がセットされる。

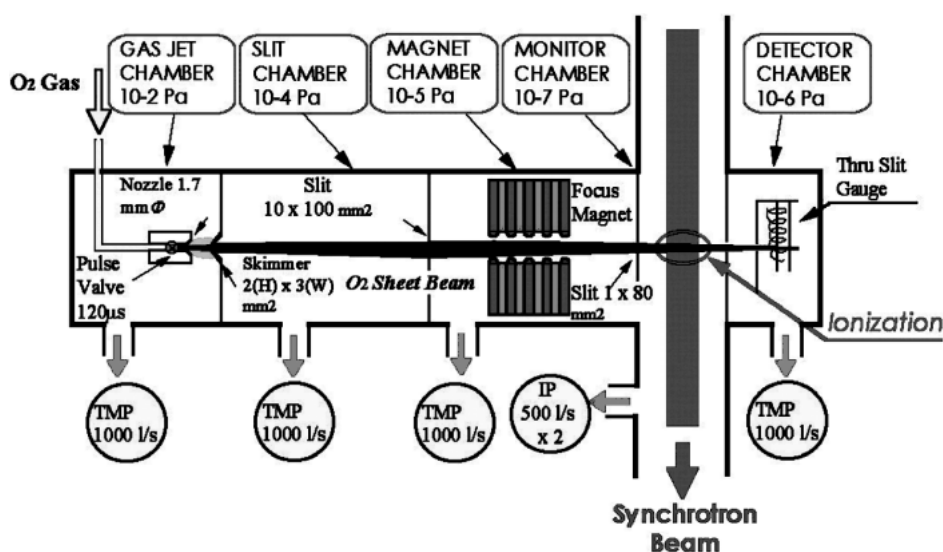


図1 酸素分子ガスシートビームプロファイルモニター概要。差動排気のスリットは酸素分子ビームをガスシート状に成形する役目ももつ。そのサイズと、ガスシートが走行中の標準的な各チャンバーでの圧力値を示す。

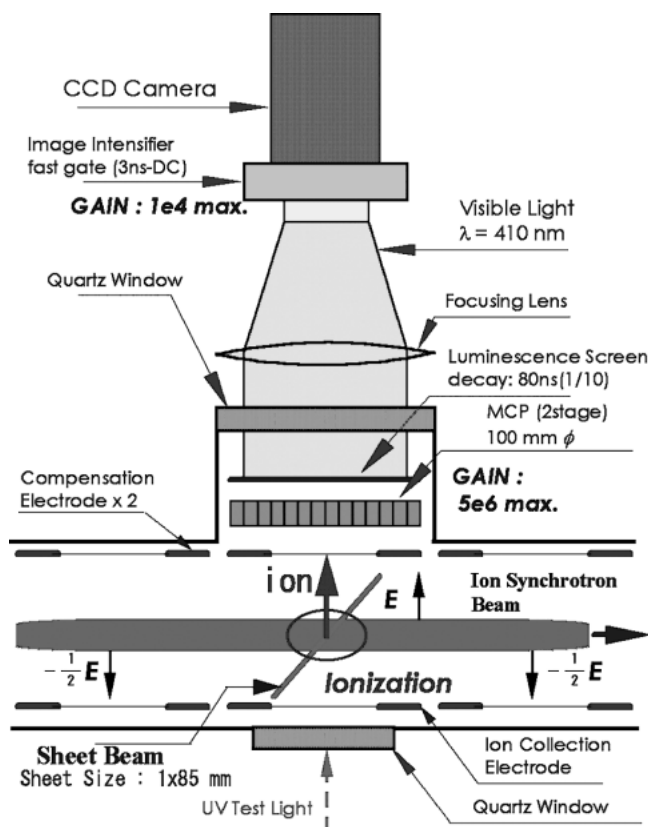


図3 ビームプロファイル検出部

トロンビームに対するガスターゲットとなり、ビームとの衝突で電離イオンペアが生成される。

図3に、検出系のレイアウトを示す。ガスシートは、ビームのメディアン平面内で、仰角45度をもってシンクロトロンビームと垂直に交差する。生成された酸素イオンは、鉛直方向に印加された平行電場で加速されてMCPに到達し、その電荷が増幅される。MCPアノードのスクリーンでビームプロファイルが2次元実像として映像化される。ビーム像は、真空ビューポートを介して、大気中に置かれたIITをつけたCCDカメラから、ビームに同期して計測される。Detector chamberでは、大部分の電離しなかった酸素ビームの排気と、真空イオンゲージを用いてのシートビームの空間並びに時間密度分布を行う。

3. 酸素分子ガスシートターゲット

3.1 酸素分子線

3.1.1 ノズルビーム法⁸⁾

高圧のガスをノズルと称する小さなオリフィスを通して真空中に出射するとき、ある断熱的な自由膨張が生じる。特に、オリフィス直後の2~3 mmの範囲では、出射された分子同士は、大きな頻度で御互いに衝

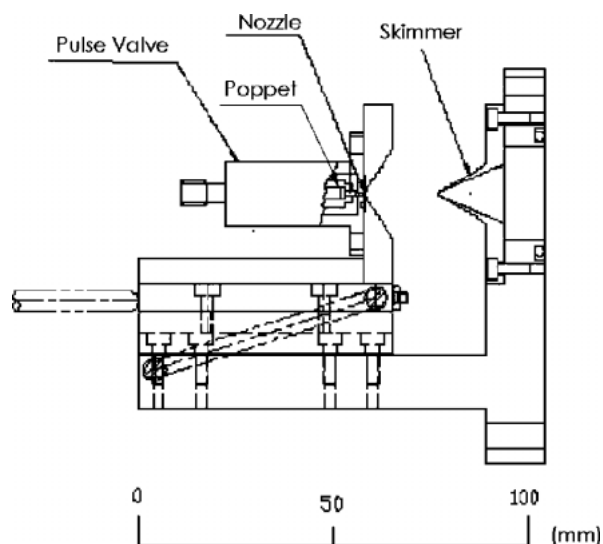


図4 ノズル・スキマー部

突を繰り返す。その過程で分子は冷却され、それぞれの運動量広がりも小さくなっていく。それより遠方では、ほとんど衝突は起こらない。その結果、分子はよく揃った速度を有し、進行方向中心部では、オリフィス中心からほぼ等方的な運動方向をもつ。この自由膨張領域内に、分子線の中心部分以外の不要な分子を剥ぎ取る目的でスキマーを設置する(図4)。このように生成された分子線は、終端速度を持つことが知られており、計算によれば⁸⁾、二原子分子の酸素では735 m/sとなり、分子温度は、数ケルビン程度となる。また、パルス化(本装置では120 μs)することで、基点圧力を上げることができ、分子線強度が向上するとともに、出射ガス量が小さくなることで装置を小型化することができる。

3.1.2 バルブ、ノズル、スキマー、スリット

図4に、ノズルとスキマー部を示す。電磁パルスバルブは、Parker instruments社のtype 009(パルス時間幅:120 μs以上)である。供給されるガスは、MKS社製のマスフローコントローラ:250E及び670Aにより、圧力のばらつきは、1%以下に制御されている。ノズルとスキマーは、大きさと形状、位置関係の組み合わせを変えた多くの実験を通して最大の分子線強度が得られるように、そのパラメータが注意深く決められた^{10,11)}。ノズル孔径は、パルス射出で基点圧力を高く取れるため、比較的大きな1.7 mmとなった。ピラミッド型のスキマーは、材質に硬質アルミニウム(A5052)を用い、ブレードの内側と外側はそれぞれ放電加工とワイヤーカッティングで仕上げている。スキマーのパラメータは、ブレード角度が、外側

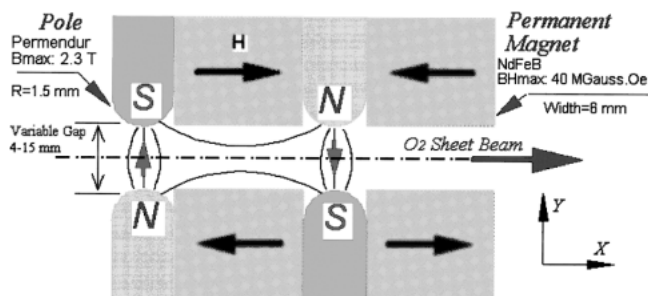


図5 収束磁石の断面図。酸素分子のスピンは磁極間を走行中、何度か磁場が反転するにも関わらず磁場方向に対するその量子状態を変えない。磁極ポールチップは、半円の形状を持つ。

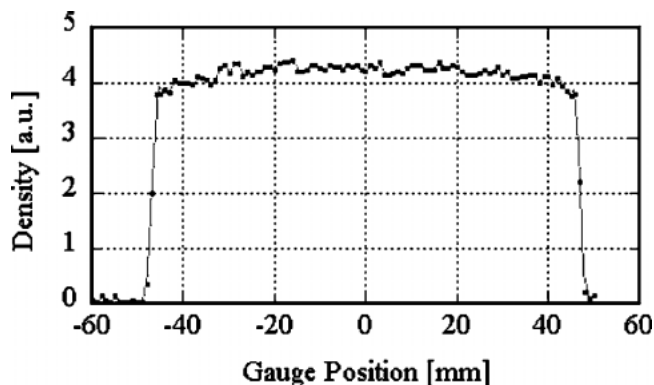


図6 ガスシートターゲットの幅方向の空間密度分布

/内側で、50/40度、ピラミッドの高さ、49 mm、スリットの開口サイズ、 $2.0(H) \times 3.0(W) \text{ mm}^2$ である。

3.2 不均一磁場による酸素分子の収束⁹⁾

酸素分子は、大きさ2 bohr-magnetonの磁気モーメントをもちスピンの1である。このような粒子は、Stern-Gerlachの実験のように不均一磁場（磁場勾配）を作用させることによりキックを受ける。この原理を応用して、酸素分子ビームをターゲット面に収束させる磁石を開発した（図5）。収束磁石は、Nd-Fe-Bの永久磁石（remanent field Br, 1.28 T; maximum BH product, 318 kJ/m^3 ）とパーメンジュールと呼ばれる高透磁率磁性体（saturation field Bs, 2.3 T）とで構成されている。

磁極のペア数は17であり、分子線進行方向の磁石長は159 mm、水平方向磁極幅（奥行）は70 mmである。収束に用いる磁場勾配の強度を調整するために、鉛直方向の磁極間隔は4~15 mmまで大気側から変えることができる。磁場計算コード poisson を用いて、すべての磁極間隔において球面収差を小さくするように磁石の形状及び構造の最適化を行った。計算と実際の測定で、酸素分子ビームの収束効果を試験したが、ギャップ12 mmの場合に、焦点距離はどちらも、260 mmとなり、ターゲット点でのガス密度が2倍に向上した。

3.3 酸素分子ガスターゲットの特性

酸素分子ガスシートターゲットの特性は、スリット（ $15^W \times 0.5^H \text{ mm}^2$ ）を前面にとりつけたBAゲージ（ステッピングモータを用いた直線導入機で空間を移動できる）で、分子線透過型の測定を行った。ゲージの出力電流は、 $5 \mu\text{s}$ の高速立上り特性をもつチャージアンプ（Keithley: type 428）で計測した。

3.3.1 横方向空間密度分布

ガスシートターゲットの厚みは、最大のガス密度が

得られる磁石の収束条件のもと1.3 mm (FWHM)であった¹⁾。ガスターゲットは、仰角45度をもつため（図3）、シンクロトロンビームから見た実効的なターゲット厚みは、 $1/\cos 45^\circ$ した1.84 mmとなる。ガスソース圧力を0.6 MPaとしたとき、ガスターゲット密度は $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ が最大となった。これは、分子線束密度に換算すると $3 \times 10^{19} \text{ molecules/sr.s}$ である。

ガスシートの幅方向の空間密度分布（図6）は、全幅85 mmであり、約60 mmのピークの平坦部分を有した。分子線密度のばらつきは、パルス毎に約 $\pm 3\%$ であったが、これは主にパルス電磁弁のポペットがパルスごとの開き具合がわずかな位置ズレを持っているためだと考えている。図で両端がわずかにカーブしているのは、ノズルビームが等方向にほぼ均一な指向性をもち、かつ距離に対して2乗分の1で密度の減衰が起こっていると考え、測定面がノズルを基点とする半径一定の球面でないためと考えられる。

3.3.2 進行方向空間密度分布

ターゲットポイントにおけるシートビームの時間方向のパルス波形の測定結果と、分子線ビームがMach 10であると仮定した場合の計算⁸⁾から求めたパルス波形は、図7に示すように良く一致した。シートビームがMach 10相当とみると、酸素分子の温度は14 K程度であり、速度は、735 m/s、運動量広がりは $\pm 10\%$ と見積もることができる⁸⁾。パルスピーク部の100 μs 程度の範囲（空間的な長さ73.5 mm）をビームプロファイル計測のターゲットとして使用する。このピーク部は、パルス出射の特性が反映されたカーブとなっているが、この範囲では、ピーク中央に対して両端で10%密度が低下している。この影響は20 mm (σ)のガウスビームを計測する場合、ビームサイズとして2.5%の誤差となる。

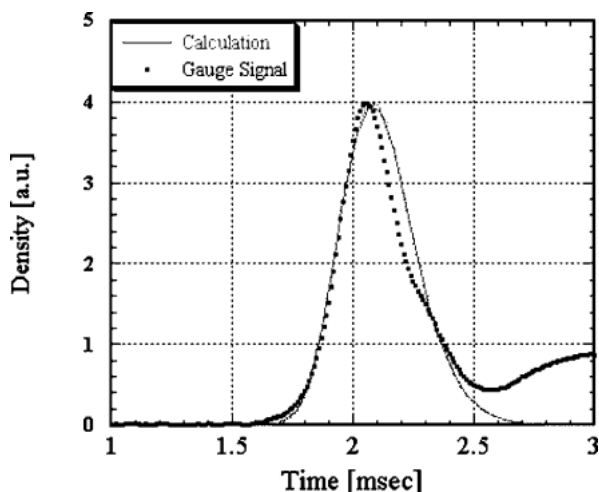


図7 パルスガスターゲットの時間構造

3.3.3 HIMAC リングの真空

ガスシートを発生させると monitor chamber (リング) の圧力は、 3×10^{-8} Pa から 7×10^{-7} Pa まで上昇する。この圧力の上昇は、ガスターゲット時間内には、全く生じていないが、その 0.5 ms 後から発生している (図7)。これは、ガスシート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る。この圧力変化は、100 ms という時間で回復されるが、この間リング上下流 5 m の地点での圧力変化はまったく生じていない。2 台のイオンポンプが効力を発揮しているためだと考えられる。

4. 計測システム

4.1 モニターヘッド概要

4.1.1 イオン収集電極

イオン収集電極 (図3, 8) は、上下二枚のステンレス製の電極で構成されており、印加する電位 (上下それぞれ $-/+4.5$ kV 程度) は、ビーム軌道平面をグラウンド電位として対称性をもたせている。電極外径は、230 mm ϕ であり、上下のギャップ間隔は 70 mm である。収集電極は、発生する電場の水平方向成分が、鉛直 (イオン収集) 方向の電場成分に対して 1% (検出位置が 0.3 mm ずれることに相当する) 以下となるように、計算機コード MAFIA を用いてデザインされた。計算による検出位置のズレの値は、MCP の検出有効径 100 mm ϕ のうち、中央部の 70 mm ϕ の範囲では 0.1 mm 以下、最外部で 0.3 mm となっている。イオン収集電場によるシンクロトロンビームへのキックを補正するために、リングの上下流それぞれ 350 mm 離れた位置に、収集電極と同じ電極を設置し (図3)、両者にイオン収集電場の $-1/2$

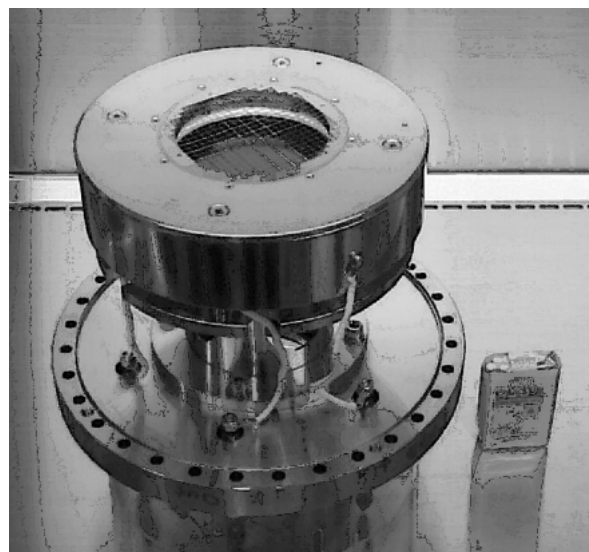


図8 MCP・スクリーンアッセンブリを組み込んだ上側イオン収集電極。写真は上部フランジが下面に来ている。MCP への荷電粒子や X 線の入射を防ぐために、周囲には大きなエプロンをまた電極中央部表面には、精度の高い平行電場を形成させるためにメッシュワイヤーが付けられている。写真にはないが、下側電極も同じ構造をもつ。

の電圧を印加している。このような電場構成とすることでリングの他の位置でのビーム軌道の変位が全くないことを確認した。

4.1.2 MCP とスクリーン

ターゲットで生成された酸素イオンは、平行イオン収集電場により位置情報を保ったまま加速されて MCP に到達する。chevron-type (2 段構成) の MCP ではその荷電増幅を行う。MCP は、浜松ホトニクス製の F2395-24PX (最大印加電圧/ゲイン: DC 2 kV/ 5×10^6) であり、有効径が 100 mm ϕ である (図3, 8)。スクリーンは、その出口部に MCP と 1.5 mm の距離をおいて置かれている。このギャップ間に最大 4 kV の電圧を印加することで、MCP より出射される電子を加速してスクリーンに衝突させ、ビームを映像化する。スクリーンの発光波長は、410 nm の青色であり、発光してから 80 ns の時間で $1/10$ の光強度にまで減衰する。この時間は、HIMAC シンクロトロンビームのバンチ間隔 (125 ns-1 μ s) より短いため、単バンチ時間内での計測が可能となる。より正確なビームプロファイル計測のために、Monitor chamber の検出器鉛直下方から石英ビューポートを通して、よくコリメートされた紫外光 (波長 \sim 200 nm) を MCP 全面をスイープ照射させて (図3)、検出器の感度分布を測っており、その値でビームプロファイルが補正

される。

4.1.3 カメラ, IIT, データ収集系

スクリーンのビームプロファイル像は、真空ビューポートを介して、大気側に設置された IIT (浜松ホトニクス社製 C2925, 最大ゲイン: 1×10^4 , 時間ゲート: 3 ns-DC) を付けた CCD カメラでビームタイミングに同期して検出される (図 3)。カメラのアナログビデオ信号は、PC の画像処理ボード (浜松ホトニクス社製 IQ-V50) 上でキャプチャーされ、10 bit \times 640 (H) \times 480 (V) の解像度でデジタル化される。PC では、デジタル化されたビームプロファイルイメージが、10 bit スケールの擬似カラーで着色されて映像となる。データ取得の最大繰り返しレートは、5 Hz である。

4.2 検出器の特性

4.2.1 検出効率

検出器は、MCP と IIT を合わせて、高い増幅機能を持っている。MCP ゲイン: 1×10^5 (標準的に使用するゲイン) のとき、すなわち、MCP で生成される一つの二次電子は、IIT のフォトカソードで 600 光電子と見積もっている¹⁾。IIT を付けた CCD カメラでは、光電子が 10 以上で検出できることから、計算上この計測系は十分なゲインを有すると考えられる。

4.2.2 検出限界

装置の検出限界と直線性の試験は、HIMAC シンクロトロンにインストールする前に、放医研の NIRS-930 サイクロトロンの取りだしビームラインにて、8 MeV の陽子ビーム (ビーム電流 $3 \mu\text{A}$, FWHM ビームサイズ $4.5 \text{ mm}\phi$) を用いて行われた。検出限界を試験したところ、クリアなビームプロファイルが見えたのは、 $20 \mu\text{s}$ (IIT ゲート時間) までであり、それより短い時間内では、まばらな星状のプロファイル像となった。Bethe-Bloch formula を用いて、これらの条件のときに生成されるイオンペアの flux density を見積もると $2.9 \times 10^5 \text{ ions/mm}^2/\text{s}$ となる。また、このとき計測時間内に生成されたイオンペア数はおよそ 100 と計算される。この測定の場合では、単位面積あたりのイオン数 $6/\text{mm}^2$ で有意なビームプロファイルの計測ができたことになる。他の条件での測定では、必要な計測時間は、生成されるイオン数の flux density に逆比例することになる。ただし低いイオン発生密度で長時間のゲート時間を用いる場合には、S/N が悪くなり、またその逆のケースでは、S/N が向上するという事に注意を要する。

4.2.3 ダイナミックレンジと直線性

計測系のダイナミックレンジは、ビーム電流 50-

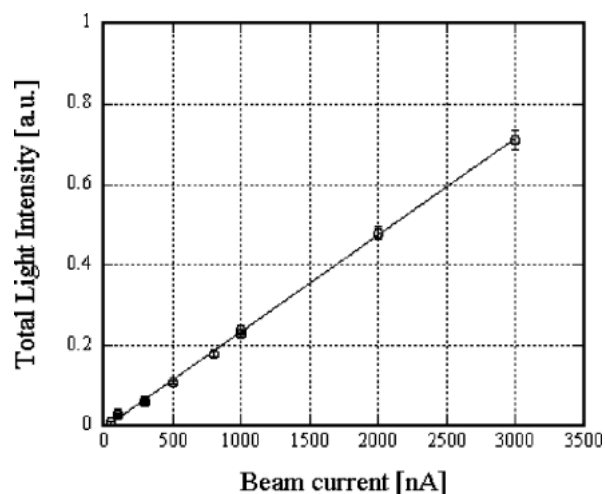


図 9 8 MeV 陽子ビームの強度と計測された光量の関係

3000 nA の範囲で、IIT ゲート時間を $20 \mu\text{s}$ に固定して、20 回の平均を計測した (図 9)。測定点のエラーバーはデータに対して 3.9% の値をもつが、これは、ガスシート発生時の 20 パルスのばらつきの標準偏差である。計測系の直線性はきわめて良好であり、MCP 及び IIT の感度 (ゲイン) を固定した場合のダイナミックレンジはおおよそ 60 程度であることがわかった。

4.2.4 分解能

検出器の分解能は、HIMAC シンクロトロン (§5 で詳述) にて、電子冷却により非常に細く絞った 6 MeV/n のアルゴンイオンビームを用いて評価した。一定の電子冷却条件のもとでは、電子冷却と intrabeam scattering が平衡に達した時に一定のビームサイズになる。従って、ビーム強度を徐々に減じていくことによりビームサイズはより小さくなる。そこで、ビーム強度をさらに減じてもビームサイズが変化しなくなった時を検出器の分解能とみなした。結果は、水平方向で 0.76 mm (FWHM)、垂直方向で 1.51 mm (FWHM) であった。垂直方向は、ガスターゲットの厚みの影響で大きいと考えられる。

5. ビームプロファイル計測

5.1 加速ビーム

本装置は、2002 年 3 月に HIMAC シンクロトロンにインストールされ、その 5 月からビームプロファイルの計測が開始された。最初に高速計測試験を行った。HIMAC で通常のガン治療に用いられる $^{12}\text{C}^{6+}$ ビームを用いて、エネルギー 350 MeV/n、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

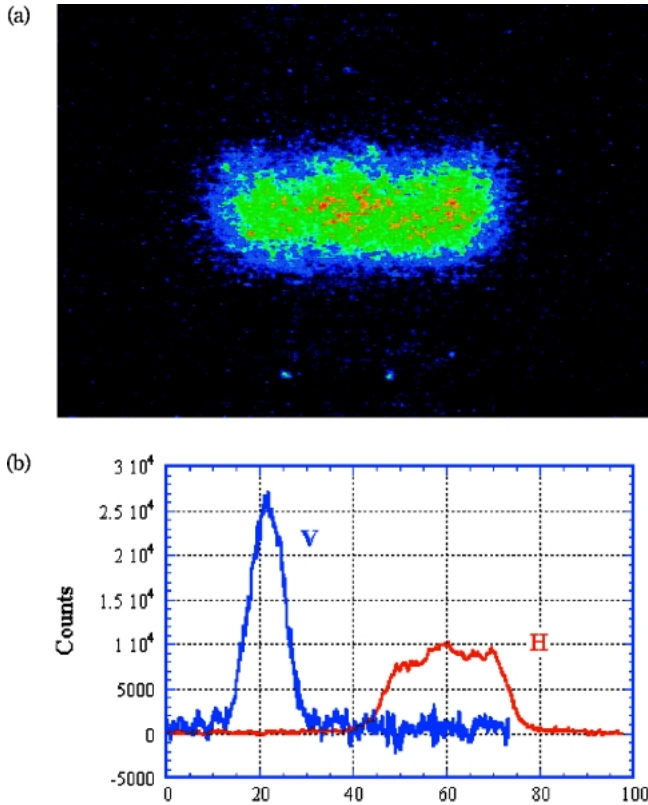


図10 (a) $^{12}\text{C}^{6+}$ ビームの単バンチのビームプロファイル, (b) その水平, 垂直方向への射影. 図(a)のスケールは $63^{\text{H}} \times 38^{\text{V}} \text{ mm}^2$ である.

に短い 100 ns の IIT ゲート時間で, クリアな二次元ビームプロファイルを計測することができた (図 10 (a)). この計測時間内での全発生イオン数とその flux density は, それぞれ, $150, 6.7 \times 10^6 \text{ ions/mm}^2/\text{s}$ と計算される. 図 10(b)には, 水平ならびに垂直方向に射影したビームプロファイルを示す. 統計的ながたつきがわずかに見られるが, ビームプロファイルのスタディーには十分に適用できるものであった. この計測では, MCP 及び IIT のゲインは, それぞれ, $1 \times 10^5, 3 \times 10^2$ 程度であった. また同じ条件で, シンクロトロンへの入射時から取り出し時まで (6–430 MeV/n) のビームの変化を, 10 回の計測平均を取って調べた. 図 11 に示すように断熱減衰の様子が良くわかる.

5.2 電子冷却による冷却された重イオンビーム

電子冷却されたビーム^{12–14)}のスタディーは, コーティングな Ar^{18+} ビーム (粒子数 1×10^6) のエネルギーを入射時の 6 MeV/n に固定して, 3.3 s の周期内に一定の電子冷却を与えることで行われた. IIT ゲート時間 100 μs で計測された典型的なクーリング過程のイメージとその射影したプロファイルを, それぞれ図 12, 13 に示す. 図から, 3 s の冷却後には, ア

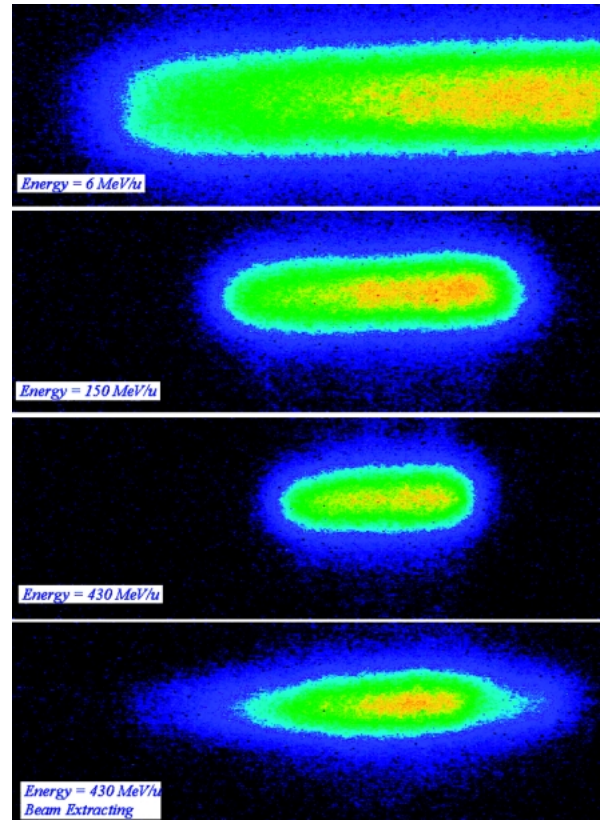


図11 入射から取り出し (6–430 MeV/n) までの $^{12}\text{C}^{6+}$ の加速ビーム. 入射時のビームは内側(図の右側)に大きく広がっており, MCP の検出範囲 (中心軌道に対して, $\pm 50 \text{ mm}$) から外れている. エネルギーが増すとともに, 中心軌道のまわりにビームがシュリンクしていく adiabatic dumping の様子が見られた. 水平方向のビームサイズ (FWHM) は, 入射時に 50 mm を越えていたが, 350 MeV/n まで減衰し, それ以上高いエネルギーでは, 22 mm で一定となった. 取り出し時には, 水平方向に rf キック¹⁴⁾を与えているためと見られる広がりがあり, ビームサイズは 26 mm となった. 垂直のビームサイズに関しては, 入射時に 12 mm であったものが, 250 MeV/n 程度まで減衰して, 7–8 mm の大きさとなった.

ルゴンビームはよく冷却されていることがわかり, 水平ならびに垂直方向のビームサイズは, それぞれ, FWHM で 1.82 mm 及び 2.20 mm にまで小さくなった (垂直方向の値にはガスシートの厚みのエラーが含まれる). 3 s のデータの生成イオン数とその flux density は, それぞれ, 135, $4.3 \times 10^5 \text{ ions/mm}^2/\text{s}$ と見積もられる.

この実験時に, 9 kV であるイオン収集電圧が適正かどうか電圧を変えてをチェックしたが, 上下電極間の印加電圧が, 8–10 kV の範囲でプロファイルは全く変化しなかった. また, ビームエミッタンスについ

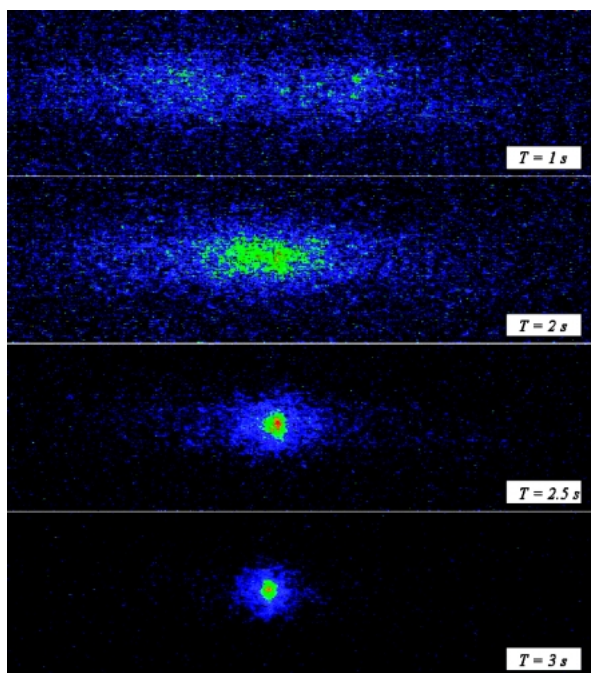


図12 フルストリップ・アルゴンイオンビームのビームプロファイルの電子冷却による変化. 画像横幅は58 mm.

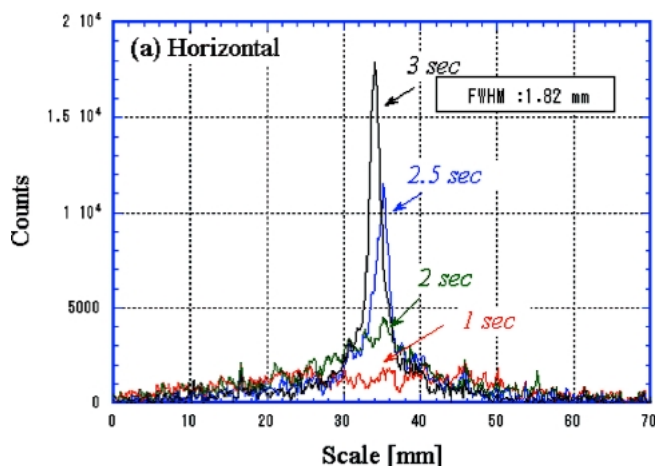


図13 図12のビームプロファイルの水平方向への射影

て3 m 下流にある残留ガスを用いたビームプロファイルモニター³⁾との比較を行ったが、よい一致を見た。さらに、ガスターゲットのビームへの影響については、散乱や荷電変換などが考えられるため、静電モニターからのショットキー信号を用いて、周回周波数スペクトラムを詳細に調べたが、ガスターゲットのありなしでの有意な差は観測されなかった。その理由として、ガスターゲットは、密度が 1×10^{-4} Pa で、ビームから見た厚みが 1.8 mm あるが、それを周長

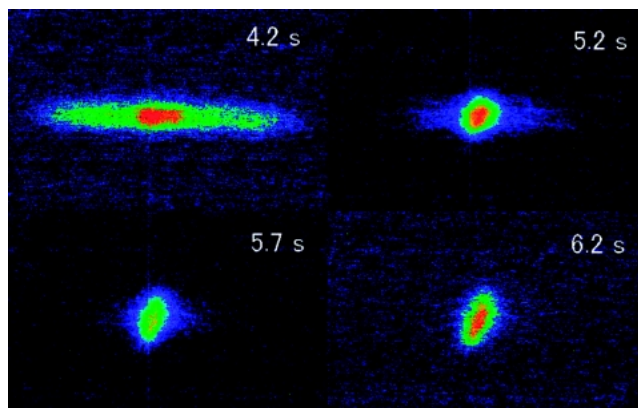


図14 電子冷却時の高密度ビームの不安定性の様子

130 m のリング全体の平均で考えれば 1.4×10^{-9} Pa となり、リングの平均圧力 1×10^{-8} Pa に対しては 10 % 程度の増加に過ぎないためと考えられる。

5.3 電子冷却時の高密度ビームの不安定性[15]

エネルギー 6 MeV/n の Ar^{18+} ビームに連続した電子冷却を行いながら、ビーム冷却蓄積の試験（冷却したビームをそのままに 6 秒周期で新しい入射を繰り返す）を行ったところ、ビーム強度が一定値を越えると鉛直方向の激しい振動を伴う不安定な状態が見られ、ビームが急激にロスすることが確認された。IIT のゲート時間 $120 \mu\text{s}$ で計測したこのときのビームプロファイルの様子を図 14 に示す。

不安定性によるビームロス、入射後 5~6 秒の間に観測されているが、プロファイルでは 5.2 秒まではビームが冷却されて小さくなっており、それ以降で鉛直方向よりやや傾いた方向に広がっていることがわかる。冷却途中の 4.2 秒の時点ではビームは水平方向に広がっていることから考えると、この不安定性は空間電荷密度の高い場合の x-y 結合が関連していると推測される。不安定が生じた時間のビーム粒子数の空間密度は、 $1 \times 10^9/\text{cm}^2$ であった。現在この不安定性は、冷却時の高密度化したイオンビームと電子ビームの間のコヒーレントな相互作用による x-y 結合共鳴に関係していると考えており、上杉を中心として継続してスタディーを行っている。

6. ま と め

HIMAC シンクロトロンにおいて、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カーボンイオンビームを用いて、ビーム強度が 2.5×10^8 ppb、ビームエネルギーが 6-430

MeV/n のとき, 二次元の実ビーム像をバンチセパレーション時間内の 100 ns で計測することに成功した. 電子冷却された重イオンビームに対しても, クリアにクーリング過程を計測することができた. また, 二次元の実像プロファイルであることを用いて, ビーム不安定時の変形の測定に大きく威力を発揮しており, ここで紹介した上杉の実験以外にもいくつかのスタディーに有用されている.

おわりに

この開発は故藤田雄三氏が奮闘して立ち上げてくださったものである. 開発がスタートしてまもなく急逝されたことは誠に遺憾であり, 氏のご冥福を心から祈りたい. メンバーは志を引き継いで全力を傾注してこの最初の到達点を見た. 次は窒素分子のガスターゲットからの脱励起光を直接計測する手法での大強度陽子ビームの 2 次元実像プロファイルモニターの完成を目指して鋭意取り組んでいるところである. この開発においては, 放医研では平尾泰男先生, 曾我文宣先生をはじめとする加速器物理工学部と AEC の加速器エンジニアのみなさまに, KEK では永宮正治先生, 森義治先生をはじめとする多くの方々に, 絶えず励ましのお言葉をいただき大変お世話になったことに, そして理研の森田浩介氏の援助に, この紙面をお借りして心よりお礼を申し上げたい. またこの開発の一部は, 平成 13~14 年度の文科省科研費を得て行われ, 実験は, 放医研重粒子線がん治療装置の共同利用の一環と

して行われた.

参考文献

- 1) Y. Hashimoto, et al., Nucl. Instr. and Meth. A527, p. 289 (2004).
- 2) S. Yamada, Proc. of 2nd APAC, Beijing, pp. 829-834 (2001).
- 3) T. Honma, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 490, p. 435 (2002).
- 4) B. Vosicki, et al., IEEE Trans., NS-22, p. 1475 (1975).
- 5) R. Galiana, et al., Proc. of PAC, USA, pp. 1198-1200 (1991).
- 6) G. I. Budker, et al., *Particle Accelerators*, p. 197 (1976).
- 7) A. V. Bublely, et al., *Proc. of 17th HEACC*, Dubna, Russia (1998).
- 8) D. R. Miller, "Atomic and Molecular Beam Methods, Volume 1", Edited by Giacinto Scoles, New York, Oxford Press, p. 14 (1988).
- 9) T. Fujisawa, Y. Hashimoto, T. Morimoto and Y. Fujita, Nucl. Instr. and Meth. A 506, pp. 50-59 (2003).
- 10) Y. Hashimoto, et al., Proc. of 8th EPAC, Paris, p. 1900-1902 (2002).
- 11) Y. Hashimoto, et al., Proc. of 2nd APAC, Beijing, p. 791-793 (2001).
- 12) K. Noda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A441, pp. 159-166 (2000).
- 13) K. Noda, et al., Proc. of 8th EPAC, Paris, pp. 1380-1382 (2002).
- 14) K. Noda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A374, pp. 269-277 (1996).
- 15) T. Uesugi, et al., Proc. of 9th EPAC, Lucerne, pp. 1321-1323 (2004).