

名古屋大学図書



20118946

**d-D ガスターゲット開発による5~7MeV 中性子の  
放射化断面積の測定**

(研究課題番号 15560723)

平成 15~16 年度科学研究費補助金 基盤研究(C)(2)

研究成果報告書

平成 17 年 3 月

研究代表者 柴田理尋

(名古屋大学アイソトープ総合センター助教授)

## は し が き

3 段の静電四重極レンズおよびパルス化装置を作成し、名古屋大学 KN-3750 Van de Graaff 加速器を用いて、5 ~ 7 MeV 領域の放射化断面積の測定を、生成核の半減期の制限を受けることなく行える見通しを得た。

3 段の静電四重極レンズの両端と中央にかける印加電圧比を 1:1.05 にすることにより、加速電圧 2.0 MV までのビームを直径 2 mm 以下に収束させることができた。また加速電圧 3.75 MV までのビームも同様に収束させることが可能であるという見通しを得た。D<sub>2</sub> ガスターゲットに付属しているスリットが直径 2.5 mm であることから、静電四重極レンズを用いることにより、スリットから発生する散乱中性子を低減させることが可能であると考えている。

ディフレクターを用いてビームがパルス化されることを、コルツを用いて目視することで確認した。ターゲット電流量を測定し制御回路と同期が取れていることを確認した。

### 研究組織

研究代表者 柴田理尋 (名古屋大学アイソトープ総合センター助教授)

### 交付決定額(配分額)

平成 15 年度	1,300 千円
平成 16 年度	800 千円
合計	2,100 千円

名古屋大学図書



20118946

研究成果

## 目 次

1. 序	3
1.1 はじめに	3
1.2 KN-3750 Van de Graaff	4
1.3 D <sub>2</sub> ガスターゲット	4
1.4 研究の目的	5
2. 静電四重極レンズ	5
2.1 原理	5
2.2 静電四重極レンズの作成	6
2.3 特性評価	7
3. ビームのパルス化	8
3.1 ディフレクター	8
3.2 電気回路	9
3.3 電源の特性	9
3.4 性能試験	10
4. 結論	10
5. 今後の展望	11
謝辞	11
参考文献	12

# 1. 序

## 1.1 はじめに

中性子の核反応断面積は、加速器など中性子が発生する施設での線量評価・遮蔽計算等の分野だけでなく、核反応機構や核構造の解析などの理論物理分野および核融合炉の設計にも利用されている。20 MeV までの中性子に対する核反応断面積データベースとして JENDL-3.3 [1]などの、実測値・理論計算を基にした評価値が利用可能である。核反応断面積を実測することにより、評価値の信頼性向上に貢献できる。

DT 核融合炉の開発のため、14 MeV 付近では精力的に測定が行われ、これまで数多くの実測値の報告がある。それ以外のエネルギー領域では適当な中性子源が少なく実測値が少ない。加えて、10 MeV 以下では中性子放射化断面積の値自体が小さく測定が困難である。14 MeV 領域には実測値が固まっているが、10 MeV 以下では報告がない。しかしながら、構造材と反応を起こす中性子の大部分が数 MeV 以下であり、この領域の放射化断面積の精度が設計尤度にきいてくる。

原子核に関する研究を行う上でも偏ったエネルギー領域のデータのみには頼るのではなく、広い範囲のデータを基に理論と比較する必要がある。

放射化法により測定できる核種は、安定核約 300 個中、実測可能な同位体は、d-T 中性子源を利用できる 14 MeV 領域でも、試料、半減期、中性子強度などの制約により、最大でも 60 種程度しかない。残りの断面積は理論計算により求めることになるが、断面積の系統性を研究することで、未測定核の断面積予測や信頼性の低いデータの確認に利用できる。

14 MeV の領域では実験データが比較的豊富であることから系統性が積極的に研究されてきた。14 MeV をはじめとする何点かの領域での系統式を作成すればそこから励起関数を導くことが期待できる。しかし、現時点では系統式は 14 MeV 領域のみであり、それ以外のエネルギー領域での系統性は全く研究されていない。

数 MeV の単色中性子源として  $D(d, n)^3\text{He}$  反応が利用されている。放射化断面積測定を行っている施設の多くは加速電圧が 300 kV 程度のコッククロフト型加速器を使用しているため、最大で 3 MeV 程度までの中性子しか得られない。さらに、d-D 反応は d-T 反応に比べ中性子生成断面積が約 20 分の 1 しかなく得られる中性子束が少ない。

d-D 反応を用いた測定では、世界トップクラスの中性子源である日本原子力研究所の Fusion Neutronics Source (FNS) を利用し 2 ~ 3 MeV 領域で放射化断面積を測定し、(n, p) 反応 16 個、(n,  $\alpha$ ) 反応 2 個、(n, n') 反応 15 個の実測値を得ている。

励起関数を実測値により作成するという観点から、中性子のエネルギー領域の拡張

が重要である。d-D 反応は入射  $d^+$  粒子のエネルギーが数 MeV になれば、中性子発生断面積が 300 keV の約 2 倍になり、前方方向への中性子発生率が高くなり、効率的に中性子が得られる。数 MV の加速器として、電圧がきわめて安定で、加速粒子のエネルギーの一様性がよい、バンデグラフ型加速器と組み合わせることで 7 MeV までの中性子に対する放射化断面積の測定が可能となる。

これまで、中性子の発生に名古屋大学工学研究科に設置されている KN-3750 Van de Graaff (KN-VdG) を用いて、3 ~ 6 MeV 領域の放射化断面積の測定を行ってきた。しかしながら、ビームをスリットで切ることにより整形を行っているため、スリットに吸蔵した重水素によっても中性子が発生し、散乱中性子により生成した誘導放射能の補正量が大きくなるという問題がある。

## 1.2 KN-3750 Van de Graaff

最高加速電圧 3.75 MV のバンデグラフ型加速器である。Fig. 1 に概略図を示す。加速されたビームはアナライジングマグネットで曲げられ、各コースに導かれる。アナライジングマグネットには常に一定の磁場がかかっているため、各コースに入射するビームのエネルギーは一定である。中性子の発生には 45 度方向の R3 コースを用いた。d-D 中性子源として  $D_2$  ガスターゲットと重水素吸蔵チタン固体 (Ti-D) ターゲットがある。今回は 5 ~ 7 MeV 中性子を対象としているので、 $D_2$  ガスターゲットを用いた。

## 1.3 $D_2$ ガスターゲット

ガスターゲットは、 $8 \text{ mm}^{\dagger} \times 28 \text{ mm}^{\dagger}$  のアルミニウム製で、ビームの入射窓に厚さ 2.2  $\mu\text{m}$  のハーバーフォイルを用いている。重水素ガスの圧力は絶対圧で 1.6 atm で使用している。ハーバーフォイルの組成を Table 1 にガスターゲットの断面図を Fig. 2 に示す。

発生する中性子エネルギーの幅は約 200 keV と単色性が良く、単位電流量当たりの中性子発生量は多い。しかし、ハーバーフォイルの強度の制約から照射電流量の上限値は約 3  $\mu\text{A}$  と大電流での照射が不可能である。実験では、照射中の電流の揺らぎも考慮して 1 ~ 1.5  $\mu\text{A}$  で使用している。発生する中性子束密度は、照射電流が約 1  $\mu\text{A}$  で入射  $d^+$  ビームに対し 0 度方向、ターゲット表面に密着の位置で約  $1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  である。しかし、入射窓のハーバーフォイル中におけるエネルギーストラグリングが問題となり、入射  $d^+$  ビームのエネルギーが 1 MeV 以下では中性子源として不適切になる。

## 1.4 研究の目的

(1) 静電四重極レンズを作成し、散乱中性子を低減させる。

スリットから発生する散乱中性子を低減させるために、静電四重極レンズ用スリットを用いることなくビーム整形を行う。

(2) 半減期1秒以下の短寿命核生成断面積測定に向けたパルス化装置を作成する。

検出器を中性子照射室に設置し、パルスビームを用いてサンプルを輸送することなく、短寿命核生成断面積測定を可能にする。

## 2. 静電四重極レンズ

### 2.1 原理

静電四重極レンズは Fig. 3 のように双曲線上に電圧をかけることで電場を発生させ、ビーム軌道进行操作する。図中の  $a$  を開口半径と呼ぶ。四重極レンズによって発生する電場は X 軸方向と Y 軸方向でそれぞれ

$$E_x = -\frac{2\phi}{a^2}X, \quad E_y = \frac{2\phi}{a^2}Y \quad (1)$$

と表される。ただし、 $\phi$  は印加電圧である。(1)式に示すように X 軸方向の電場は位置座標の X 軸成分から決定し、Y 軸方向の電場も同様に Y 軸方向の位置座標から決定する。そのため四重極レンズによるビームの軌道変化は X 軸方向と Y 軸方向を独立に考えることができる。

四重極レンズから発生する電場が Z 軸方向に無限に広がっている場合、Z 軸方向に  $\phi$  [V] で加速したビームの軌道は初期位置  $X_0$  と初速度  $X'_0$  を用いて次のように表される。

$$X = X_0 \cos \beta Z + \frac{X'_0}{\beta} \sin \beta Z, \quad Y = Y_0 \cosh \beta Z + \frac{Y'_0}{\beta} \sinh \beta Z \quad (2)$$

ただし、 $\beta = \sqrt{\frac{\phi}{a^2 \Phi}}$  である。実際の四重極レンズは電極の長さが Z 軸方向に有限のため Z 軸方向発生する電場の分布は電極の端で Fig. 4 のように変化するが、電場分布を矩形に近似し電極の実効長さを決定することで(2)式を用いることができる[2]。

四重極レンズを用いてビームの軌道を変化させる場合、X 軸方向のビームを収束させると Y 軸方向のビームは発散する。そこで四重極レンズを用いてビーム径を収束させる場合、2 段以上の四重極レンズを収束面と発散面が交互に並ぶように組み合わせ

る必要がある。2 段の四重極レンズを組み合わせた場合、発散-収束の順に電場を受けたビームは中心収束する傾きが大きいいため、焦点位置からはずれた場合のビーム径の広がり方が大きい。そこで中心位置に収束の傾きの小さいビームを得るために 3 段四重極レンズを用いるほうが望ましい。

3 段四重極レンズは両端の電極長さを同じにし、中央の電極長さを 2 倍とすることで軸対称に設置するのが一般的である。このような軸対称の四重極レンズは、両端の電極に同じ電圧をかけ、中央の電極に両端よりわずかに強い電圧をかけることでビームが収束する[2]。

## 2.2 静電四重極レンズの作成

加速電圧 3.75 MV までのビームを収束させる四重極レンズを作成した。作成した四重極レンズは Fig. 5 のように、3 段の四重極レンズを軸対称に並べた構造である。四重極レンズの開口半径は 6.0 mm、各々の四重極レンズの電極長さは 80, 160, 80 mm、電極同士の距離は 30 mm とした。前後の四重極レンズには同じ電圧をかけ、中央の四重極レンズには異なる電圧をかけられるようになっている。四重極レンズの電極は円形に加工したアルミニウムを用いた。四重極レンズの電極は開口半径の 1.15 倍の半径を持つ円に近似することで双曲線と同等の電場が得られる。そこで電極円の半径を 6.9 mm とした[3]。

ビームを正しく収束させるためには四重極レンズを構成する各々の電極を固定する必要がある。そこで電極は $\phi 5$  mm のアルミニウム支柱につり下げ、支柱の両端をスリットにネジ留めすることで固定した。また四重極レンズの電極が着脱できるように、アルミニウム支柱の前方に取り付けられたスリットは取り外し可能な構造とした。スリットによって電極を固定するため、取り外し可能なスリットにも位置の再現性を持たせる必要がある。そこで今回作成したフランジには“いんろう”構造を組み込んだ。

四重極レンズに取り付けられた電極に安定して電圧をかけるため、電極は絶縁を保つ必要がある。そこで電極は内径 12 mm の管を使い、電極と支柱との間に 3.5 mm の距離が取れるようにした。また、電極を支柱に固定するため、絶縁性の高いアセタールを用いて固定具を作成した。作成した電極を Fig. 6 に示す。

各電極に可変の電圧をかけるため、マクセック社の高圧電源“DMYR-3000PN”を用いた。この電源は 3000 V までの電圧が印加可能で、印加電圧を調整すると 2 つの出力から絶対値が同じで符号が逆の電圧がかかる。そのため四重極レンズの X 軸方向と Y 軸方向に符号が逆で絶対値の等しい電圧をかけることが容易に行える。この電源を 2 つ用意することで、両端の四重極レンズと中央の四重極レンズに異なる電圧を印加できるようにした。高圧電源は大気中にあり、四重極レンズの電極は真空中にあるため、電圧の導入には電流導入端子を用いた。電流導入端子から電極へは同軸ケ

ケーブルを用いることで電圧を供給した。

加速電圧 3.75 MV の平行ビームを入射させ四重極レンズに 3000 V の電圧をかけた場合、電極に衝突せずターゲットまで到達するのは $\phi 10$  mm 以下のビームである。そこで四重極レンズの直前に $\phi 10$  mm のスリットを設置することで加速ビームが四重極レンズに当たることを防いだ。また四重極レンズに向かって斜めに入射するビームを低減するため、四重極レンズの直前のスリットよりさらに上流に直径 $\phi 10$  mm 水冷式スリットを取り付けた。

四重極レンズのチャンバーは前後をスリットに囲まれており、真空のコンダクタンスが小さい。そこでスリットには空気穴を設け、コンダクタンスを大きくした。また、アセタール製の固定具にも空気穴を設けることでコンダクタンスを大きくした。

## 2.3 特性評価

KN-VdG の R3 コースに静電四重極レンズを設置し、静電四重極レンズの 2 m 後方に石英ガラス(コルツ)を取り付けた。イオン源からコルツまでの間には静電四重極レンズとディフレクターが入っており、全長は約 11 m である。加えてコース中には $\phi 10$  mm のスリットが 3 ヶ所、ディフレクターの前後と静電四重極レンズの直前に入っている。このことから、静電四重極レンズに入射するビームはほぼ平行だといえる。

加速された荷電粒子がコルツに当たると発光するため、発光した面の径を測定することでビーム径を測定することができる。ただし加速器の運転中は照射室に入れないためコルツの正面後方にビデオカメラを設置し、カメラの出力映像からビーム径を測定した。コルツが発光の様子を Fig. 7 に示す。ビーム径の測定には 1.0, 1.5, 2.0 MV で加速した  $p^+$  ビームを用いた。静電四重極レンズを用いない場合、ビーム径は加速電圧 1.0 MV で $\phi 7$  mm、1.5, 2.0 MV で $\phi 5$  mm であった。

1.5 MV で加速したビームにおける、静電四重極レンズに印加する電圧とビーム径の関係を Fig. 8 に示す。このとき 3 段の静電四重極レンズには全て同じ電圧が印加されている。また理論計算より得られたビーム径の値も併記した。3 つの静電四重極レンズに 1900 V の電圧を印加すると、ビーム径は 4.0 mm の円形に収束した。印加電圧とビーム径の関係は実測値と計算値で大きくずれているが、印加電圧を上げていくにつれて、ビーム径が収束し再び広がるという傾向は一致した。

X 軸、Y 軸方向のビーム径をそれぞれ見ていくと、 $\phi 2.5$  mm 以下に収束している。そのため静電四重極レンズの印加電圧を適切に設定し、X 軸、Y 軸方向のビームを同じ印加電圧で収束させることによってビームは $\phi 2.5$  mm の円形になると考えられる。3 つの静電四重極レンズに同じ電圧を印加した状態では X 軸、Y 軸方向のビームを同じ印加電圧で収束させることはできないので、中央の静電四重極レンズに印加する電圧を独立に変化させた。



両端と中央の静電四重極レンズに印加する電圧の比を 1:0.95, 1:1, 1:1.05 に変えたときの X 軸、Y 軸方向それぞれが最小ビーム径をとる印加電圧を Fig. 9 に示す。中央の静電四重極レンズに印加する電圧を上げることにより X 軸方向のビームを収束させるために必要な印加電圧は下がり、Y 軸方向のビームを収束させるために必要な印加電圧が上がった。印加電圧の比を 1:1.05 にすることでビームは $\phi 2.0$  mm に収束した。

加速電圧 1.5 MV のとき印加電圧の比を 1:1.05 とすることで、X 軸、Y 軸方向のビームは同じ印加電圧で収束させることができた。そこで加速電圧 1.0, 2.0 MV についても同様の印加電圧比でビーム径を測定した。結果を Fig. 10 に示す。印加電圧比を 1:1.05 にすることで、加速電圧にかかわらず X 軸、Y 軸方向のビームは同じ印加電圧で収束することがわかった。ビーム径は加速電圧 1.0 MV で 1.5 mm、2.0 MV で 2 mm に収束した。この結果より中央の静電四重極レンズに印加する電圧を両端の静電四重極レンズに印加する電圧の 1.05 倍にすることで、印加電圧に関係なくビームを 2 mm 以下に収束させることが可能であるといえる。

静電四重極レンズに印加する電圧は加速電圧の値によって変わるが、加速電圧と印加電圧の関係は Fig. 11 に示すように直線で表すことができる。これはビーム軌道が (印加電圧)/(加速電圧) の関係で表されることと一致する。加速電圧 1.0 ~ 2.0 MV における加速電圧と印加電圧の関係から得た直線を用いることで、加速電圧 3.75 MV までのビームを収束させるために必要な印加電圧を決定することが可能である。

### 3. ビームのパルス化

#### 3.1 ディフレクター

ビームをパルス化する方法として、大きく分けて(1)ビームを加速する前に制御する方法と、(2)加速されたビームを制御する方法がある。加速器本体内部を改造することは難しいので(2)を採用した。

作成した装置は、ビームを電場で曲げる際に電圧を印加する平行電極板が入っているディフレクター、電極板に電圧を印加するための高圧電源、それを制御する電気回路から構成されている。高圧電源は照射室外からパソコンで制御できるようにした。

ディフレクターの概略図を Fig. 12 に示す。延長管の内部に長さ 37 cm、幅 3 cm の平行電極が入っている。電極板間の距離は 4 cm である。電極はガラス球を用いて延長管との絶縁、真空を保っている。ディフレクターは前後のアクリルフランジによりビームラインと絶縁させることによりビームラインへ影響が現れることを防ぐ。ディフレクターの前後には $\phi 10$  mm の穴の開いた水冷スリットを取り付けた。アクリルフランジにより絶縁させ、スリット電流量をモニターすることが可能である。

電圧を印加したときに、ビームを偏向させ、ディフレクター下流側に取り付けたスリットにビームを当てることによりビームを切っている。ビームの軌道計算には次の式を用いた。

$$y_1 = \frac{qV}{4dE} x^2 \quad (3)$$

$$y_2 = \frac{ql^2V}{4dE} + \frac{qlV}{2dE} (x-l) \quad (4)$$

$x$ : 電極に入ってからビームの進んだ距離

$y_1$ : ビーム進行方向と直角方向の位置へずれた距離(電極内)

$y_2$ : ビーム進行方向と直角方向の位置へずれた距離(電極以後)

$q$ : 電荷素量

$V$ : 電極にかける電圧

$d$ : 電極間距離

$l$ : 電極長さ

$E$ : 加速電圧

ビームの軌道は加速粒子の質量には依存しない。最大 3.5 MV で加速された  $d^+$ ビームを切るため、電極後方 20 cm 位置にスリットを取り付けた。

## 3.2 電気回路

KN-VdG で加速された数 MeV の粒子を電場で曲げるため、20 kV の電源と、入力される矩形波によって高圧電源のスイッチングを行う電気回路を準備した。

高圧電源を制御するパソコンは加速器の操作室にあり、発生させる矩形波により遠隔操作できるようになっている。矩形波発生には任意のパルス幅とパルス列の数を設定できるソフトを利用した。このソフトは 5 ms ~ 200 s 間隔の任意のパルス列を発生させることができる。パソコンの信号が Off の時、高圧電源のスイッチは入らず、ビームは曲がらないので On-Beam になる。パソコンの信号が On になると、高圧電源のスイッチが入り、ビームは曲げられて Off-Beam になる。

## 3.3 電源の特性

高圧電源の立ち上がり、立ち下がり方は、ビームの立ち上がり、立ち下がり方に影響を与える。パソコンからの入力に対する高圧電源の応答をオシロスコープで測定した。結果を Fig.13a に、Fig.13b に 1 パルスについて拡大した様子を示す。

電圧が印加される時にはパソコンからの信号と同期して 20 kV の電圧が印加される。逆に電圧が下がる時には、時定数 5 ms で減衰していく。この為、ビームのパルス形状の立ち上がりは矩形ではなく鈍ると考えられる。

### 3.4 性能試験

はじめに、ビームライン終端に荷電粒子が当たると発光するコルツを取り付け、加速エネルギー 2 MV で陽子を入射させた。ビームがコルツの中心に当たっている状態でパルス化装置を作動させ、コルツに当たるビームの挙動を観察した。

パソコンから信号を入力したところ、(1)高圧電源のスイッチが入るとビームは下方に動いて見えなくなる。この時、ディフレクター後方のスリットの電流量が増えた。(2)高圧電源が Off になるとビームはコルツに当たりはじめるが初期位置よりも上方に現れる。この時、ディフレクター後方の電流量は減少した。(3)その後左右にぶれながら下がって行き、(4)初期位置に戻った。この過程を Fig.14 に示す。

ビームの立ち上がり時に、戻るはずの場所よりも上方に現れるが、パルス化することを視覚的に確認できた。高圧電源が On-Off するタイミングで加速器のステアラー(ビーム位置を微調整する装置)の電圧が不安定になる現象が見られたが、これが原因と考えられる。

次に、2 MV で加速した陽子をアルミニウムターゲット(19.7 mm×21.3 mm×1.0 mm)に照射しビーム電流量の変化をオシロスコープで測定し、パソコンからの信号との同期を確認した。パルスサイクルは 0.1, 0.3, 1, 4 s である。

結果を Fig.15 に示す。上部がターゲット電流量、下部が入力する信号である。各パルスサイクルにおいて、ビームを On にする信号から 80 ms 遅れてビームは当たり始める。ビームが Off になる時のパソコンからの信号に対するビームの遅れは 5 ms 以下であった。電源の特性で見られた高電圧降下に時間がかかる影響は、ビーム立ち上がり時のステアラー電圧が不安定になってしまった為に確認できなかった。

## 4. 結論

(1) 3 段の静電四重極レンズを作成し、ビームを直径 2 mm 以下に収束することができ、散乱中性子を低減させる見通しを得た。

3 段の静電四重極レンズの両端と中央にかける印加電圧比を 1:1.05 にすることにより、加速電圧 2.0 MV までのビームを直径 2 mm 以下に収束させることができた。また加速電圧 3.75 MV までのビームも同様に収束させることが可能であるという見通しを得た。D<sub>2</sub> ガスターゲットに付属しているスリットが直径 2.5 mm であることから、静電四重極レンズを用いることにより、スリットから発生する散乱中性子を低減させることが可能であると考えている。

(2) パルス化装置を作成し、半減期 1 秒以下の短寿命核生成断面積を測定できる見通しを得た。

ディフレクターを用いてビームがパルス化されることを、コルツを用いて目視することで確認した。ターゲット電流量を測定し制御回路と同期が取れていることを確認した。

## 5. 今後の展望

作成した静電四重極レンズおよびパルス化装置を用いて、散乱中性子の少ない中性子場において 5 ~ 7 MeV 領域の放射化断面積の測定を、生成核の半減期の制限を受けることなく行う。ビームを収束させることが可能になったので、直径 5 mm の D<sub>2</sub> ガスターゲットの入射窓を狭め、ガス圧を上げることで中性子発生量を増加させ、測定可能下限値の引き下げが可能になる。

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、四重極レンズとディフレクターに関しては名古屋大学工学部物理工学科岡崎徹君、水野方嗣君に取り組んでもらいました。工学部技術室の釣田幸雄技官、増田俊雄技官、大久保興平技官には、静電四重極レンズおよびパルス化装置の作成、ビームラインの組み上げおよび真空に関して相談にのっていただき、アイデアをいただきました。バンデグラフを用いた実験では工学研究科マテリアル理工学専攻の山本洋助教授に、本報告書の清書に当たってはマテリアル理工学専攻博士後期課程の清水俊明君に協力して頂きました。皆様に感謝致します。また、実験を一緒に行ってくれた量子エネルギー核物理工学研究室の学生諸君に感謝致します。

## 参考文献

- [1] K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, O. Iwamoto, J. Katakura, T. Fukahori, S. Chiba, A. Hasegawa, T. Murata, H. Matsunobu, T. Ohsawa, Y. Nakajima, T. Yoshida, A. Zukeran, M. Kawai, M. Baba, M. Ishikawa, T. Asami, T. Watanabe, Y. Watanabe, M. Igashira, N. Yamamuro, H. Kitazawa, N. Yamano and H. Takano, *J. Nucl. Sci. Technol.* 39, 1125 (2002).
- [2] 上田正紘、永見剛一、黒田治夫 「静電型対称三群四重極レンズの集束特性」  
応用物理 第38巻 1037-1046 (1969)
- [3] S. Okayama and H. Kawakatsu, “Potential distribution and focal properties of electrostatic quadrupole lenses”, *J. Phys. E. Sci. Instrum.* 11, 211-216 (1978).

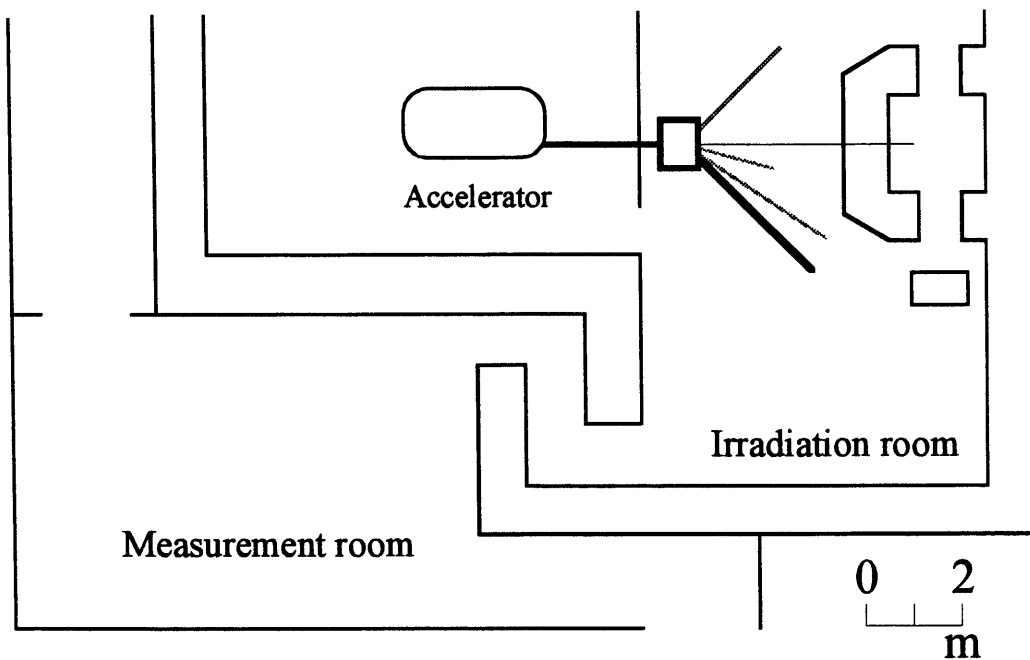


Fig. 1 A plane view of KN-3750 Van de Graaff at Nagoya University.

Table 1 Nominal composition of Havar.

Material	Abundance [%]	Material	Abundance [%]
Cobalt	42.5	Beryllium	0.04
Nickel	13.0	Manganese	1.60
Chromium	20.0	Tungsten	2.80
Molybdenum	2.0	Iron	Bal.
Carbon	0.20		

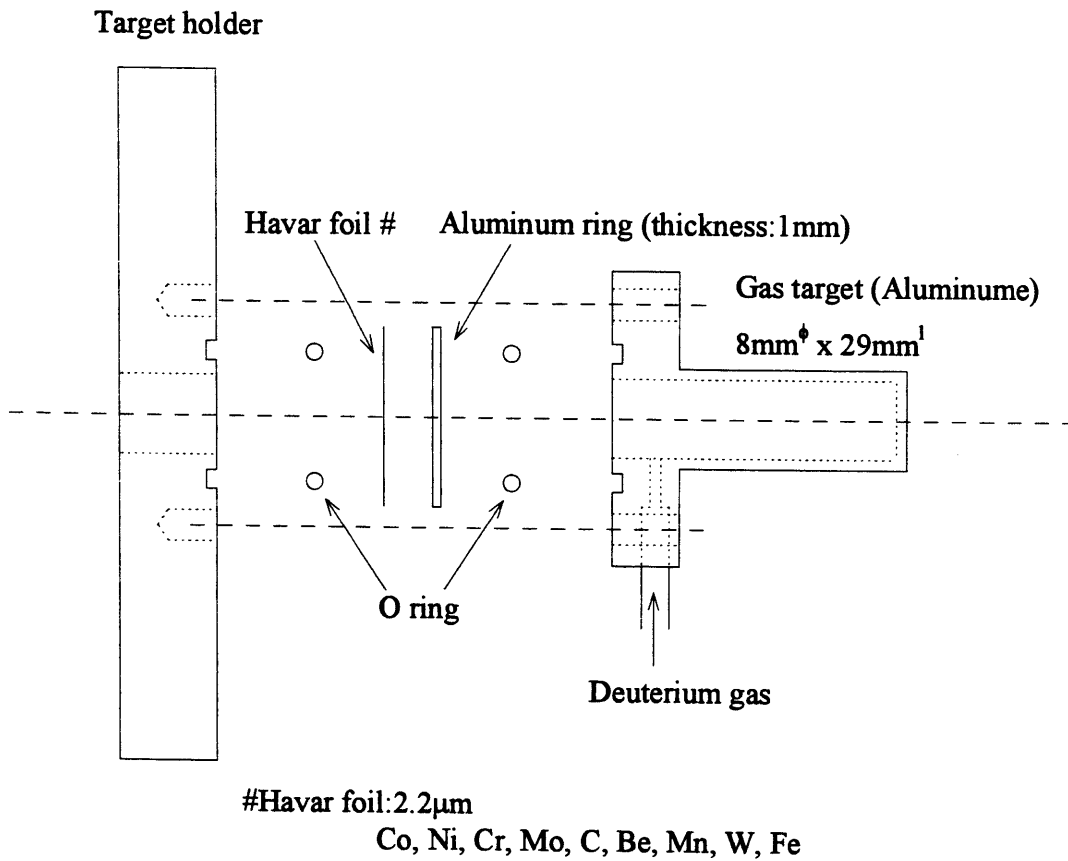


Fig. 2 Cross sectional view of gas target assembly.

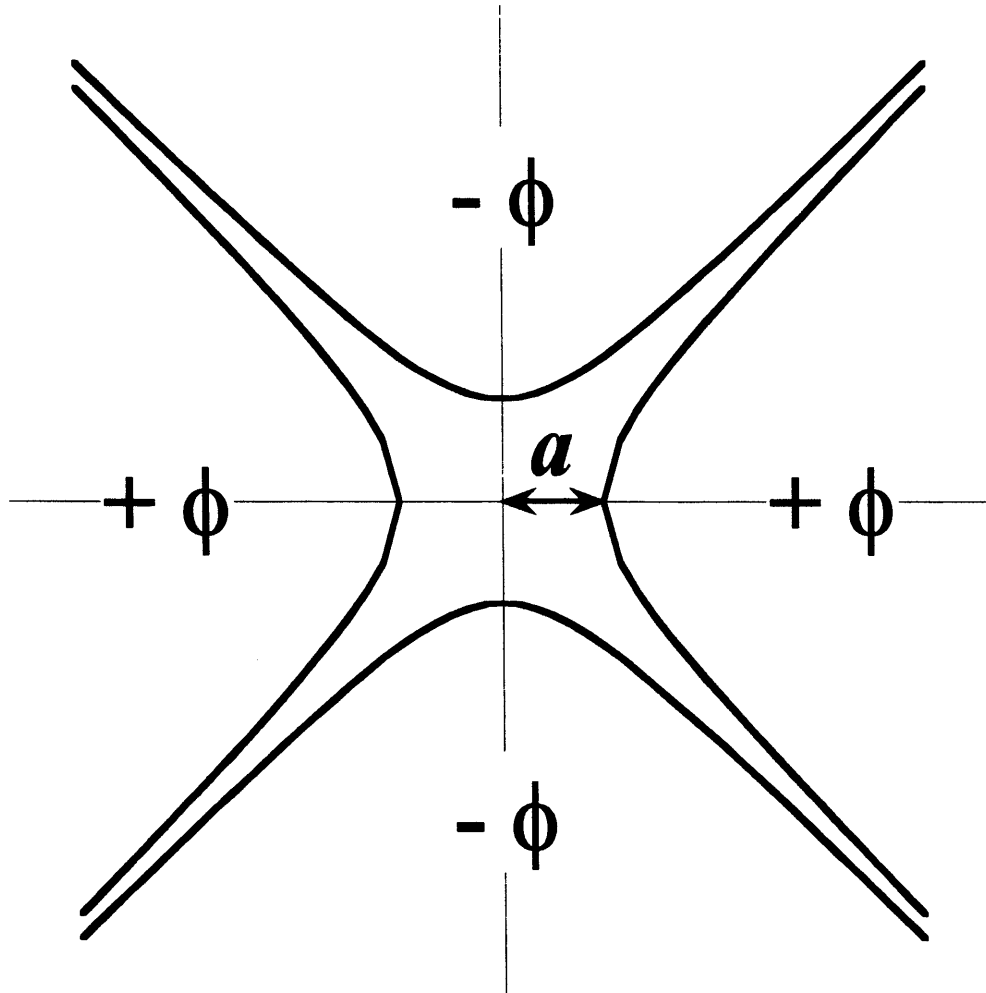


Fig. 3 A basic concept of a electrostatic quadrupole lenses.



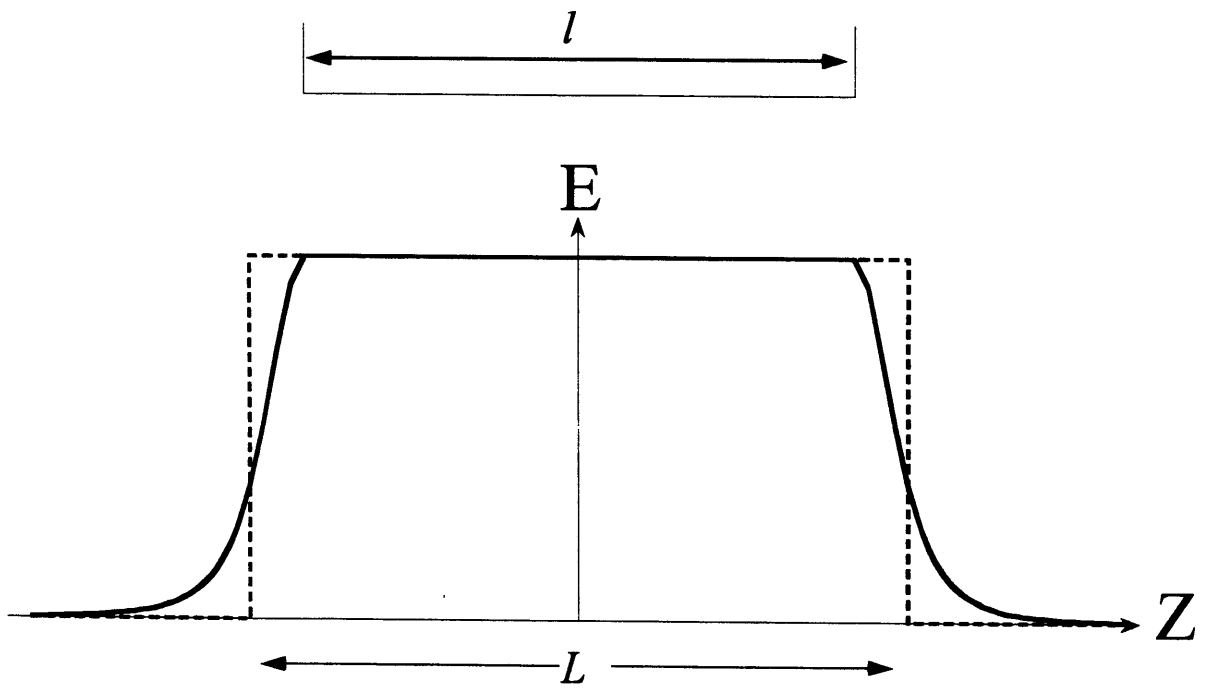


Fig. 4 A potential distribution of a electrostatic quadrupole lenses. Solid line and doted lines show modified bell-shaped model and rectangular model, respectively. Where  $l$  and  $L$  are the length of an electrode and an effective length, respectively.

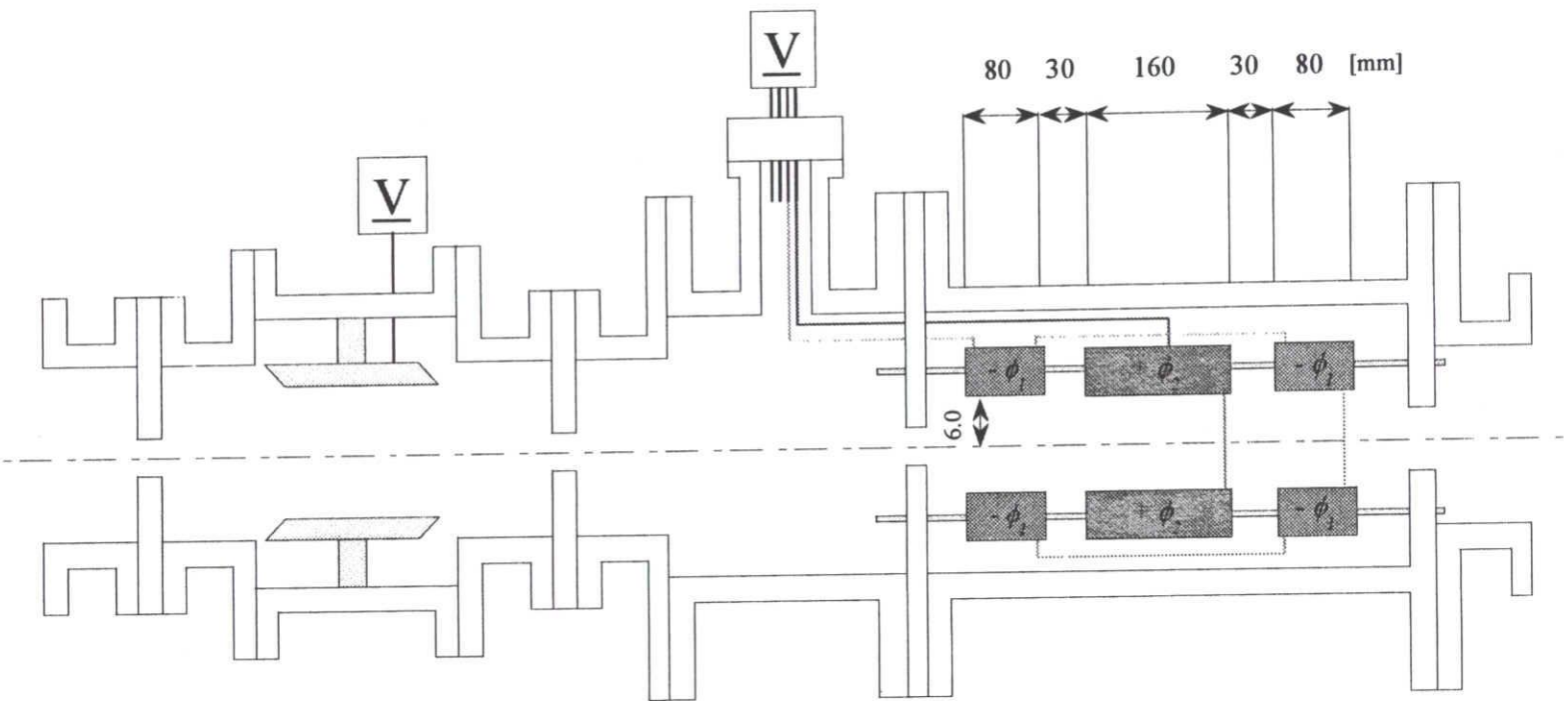


Fig. 5 A schematic view of the electrostatic quadrupole lenses.

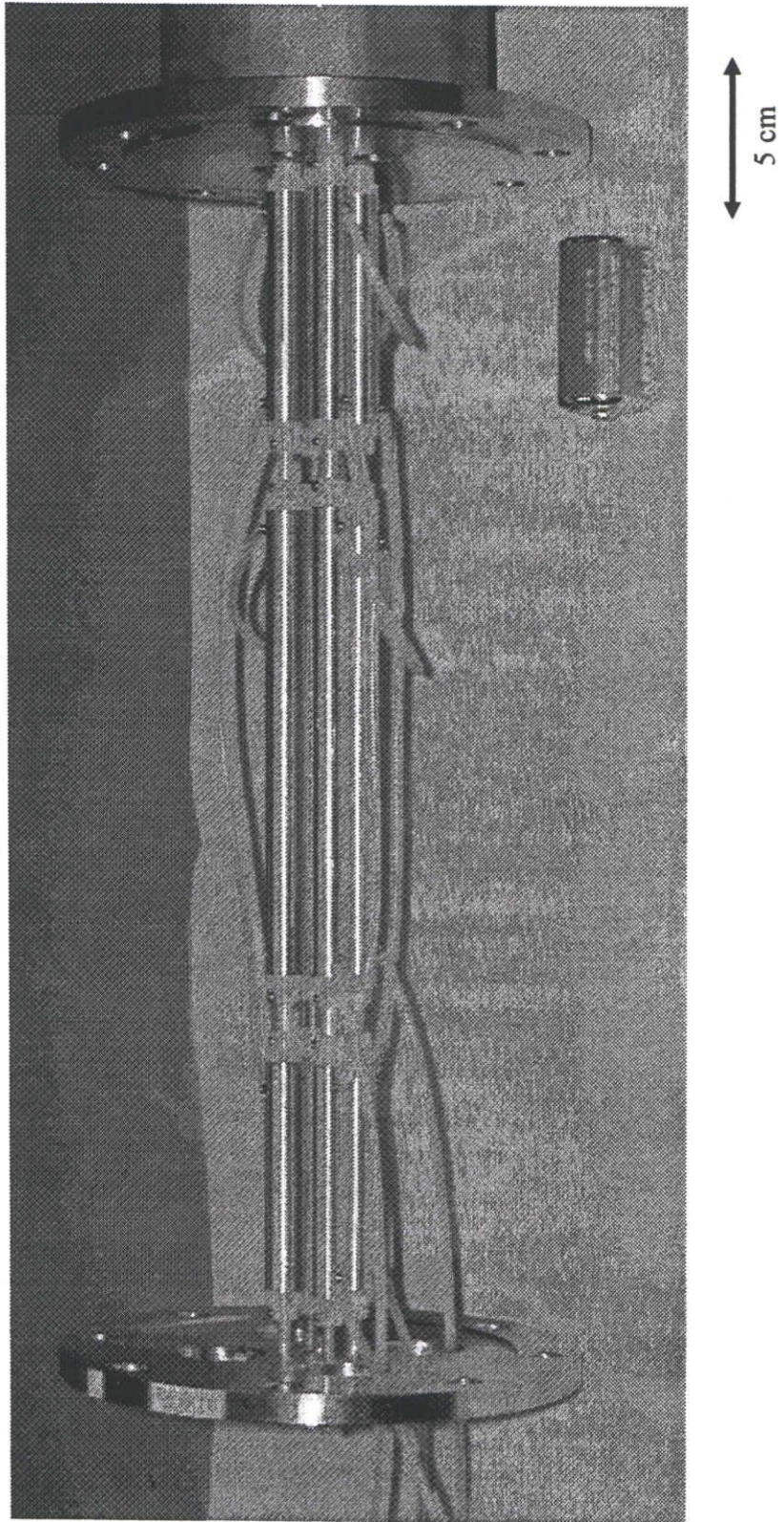


Fig. 6 A photograph of the electrostatic quadrupole lenses.

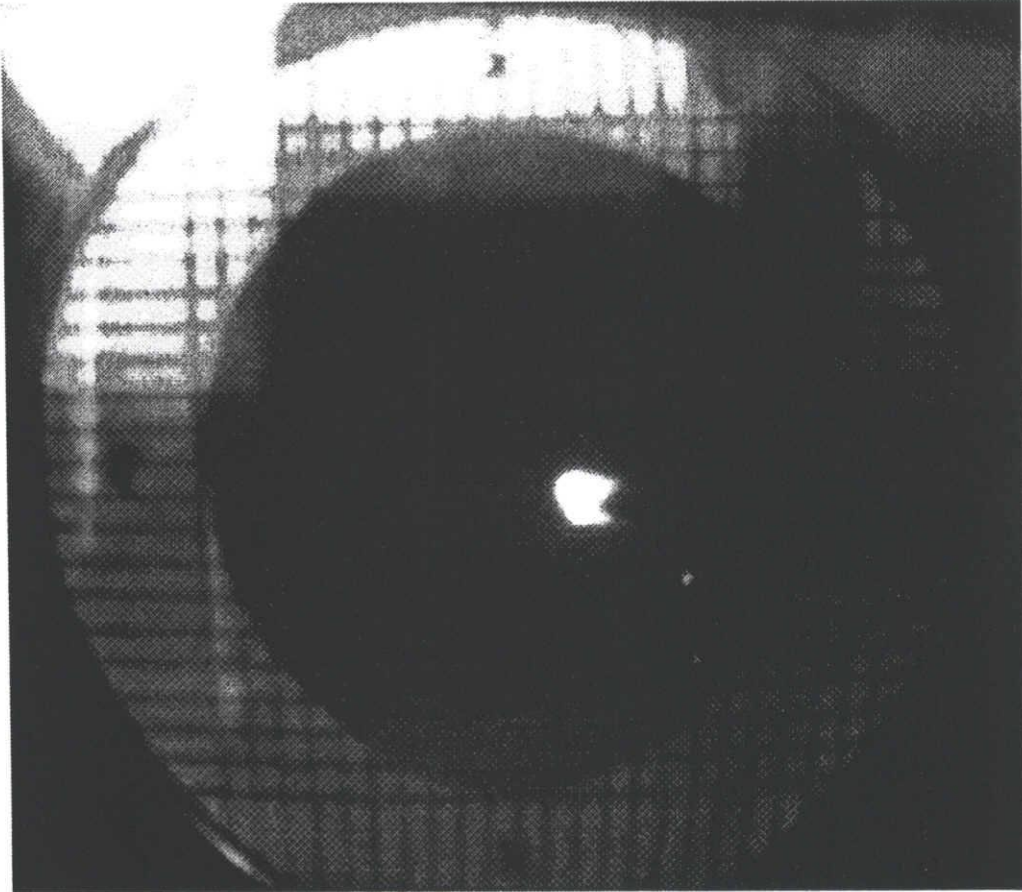


Fig. 7 A photograph of a quartz glass with 1.5 MeV proton beam.

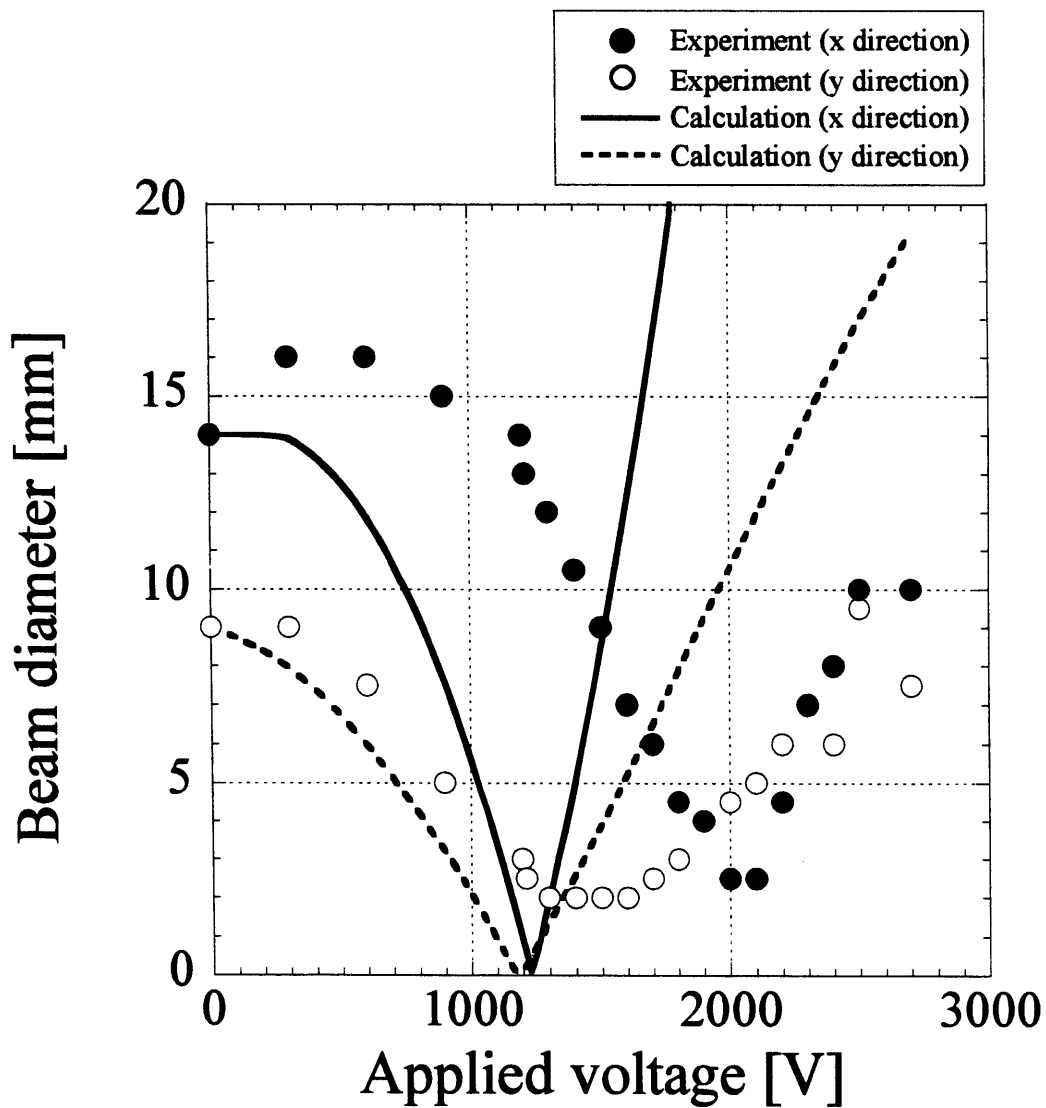


Fig. 8 The relationship between beam diameter and applied voltage for 1.5 MeV protons. Close and open circles show experiment results for x direction and y direction, respectively. Solid and dotted lines show calculated results for x direction and y direction, respectively.

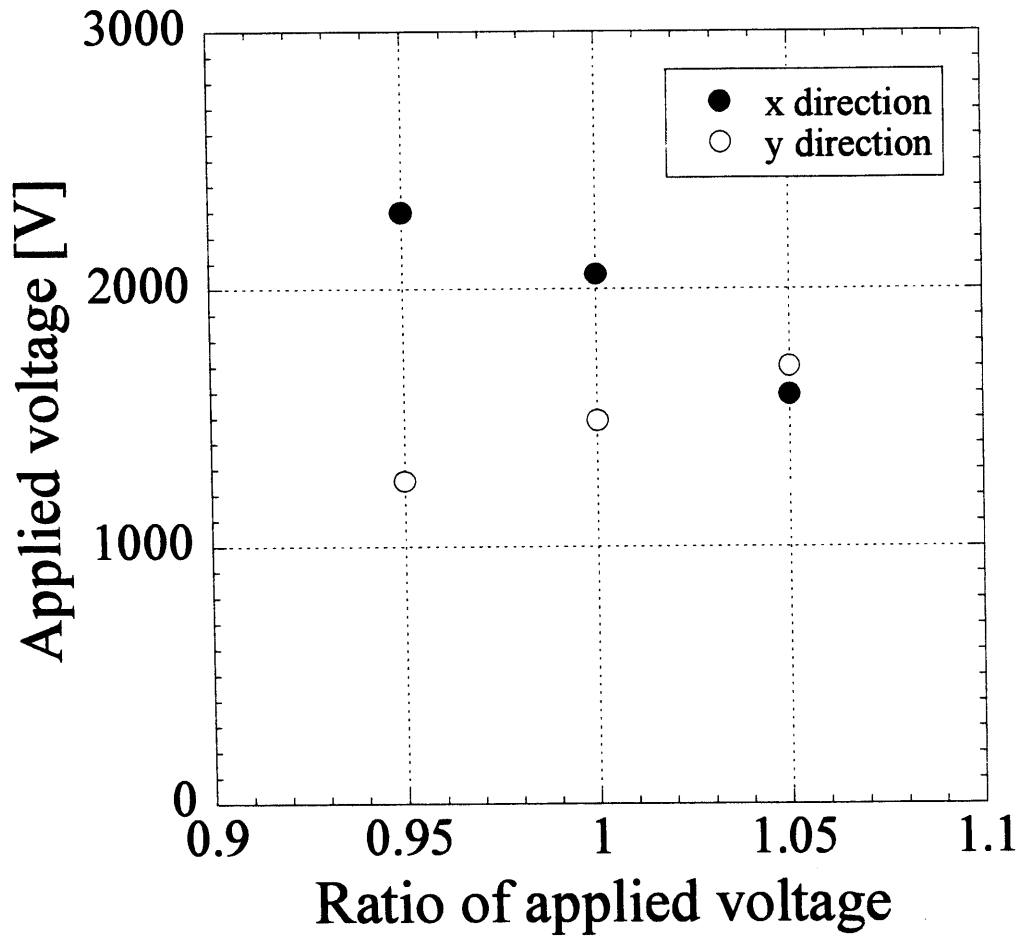


Fig. 9 The relationship between ratio of applied voltage and applied voltage. Close and open circles show experiment results for x direction and y direction, respectively.

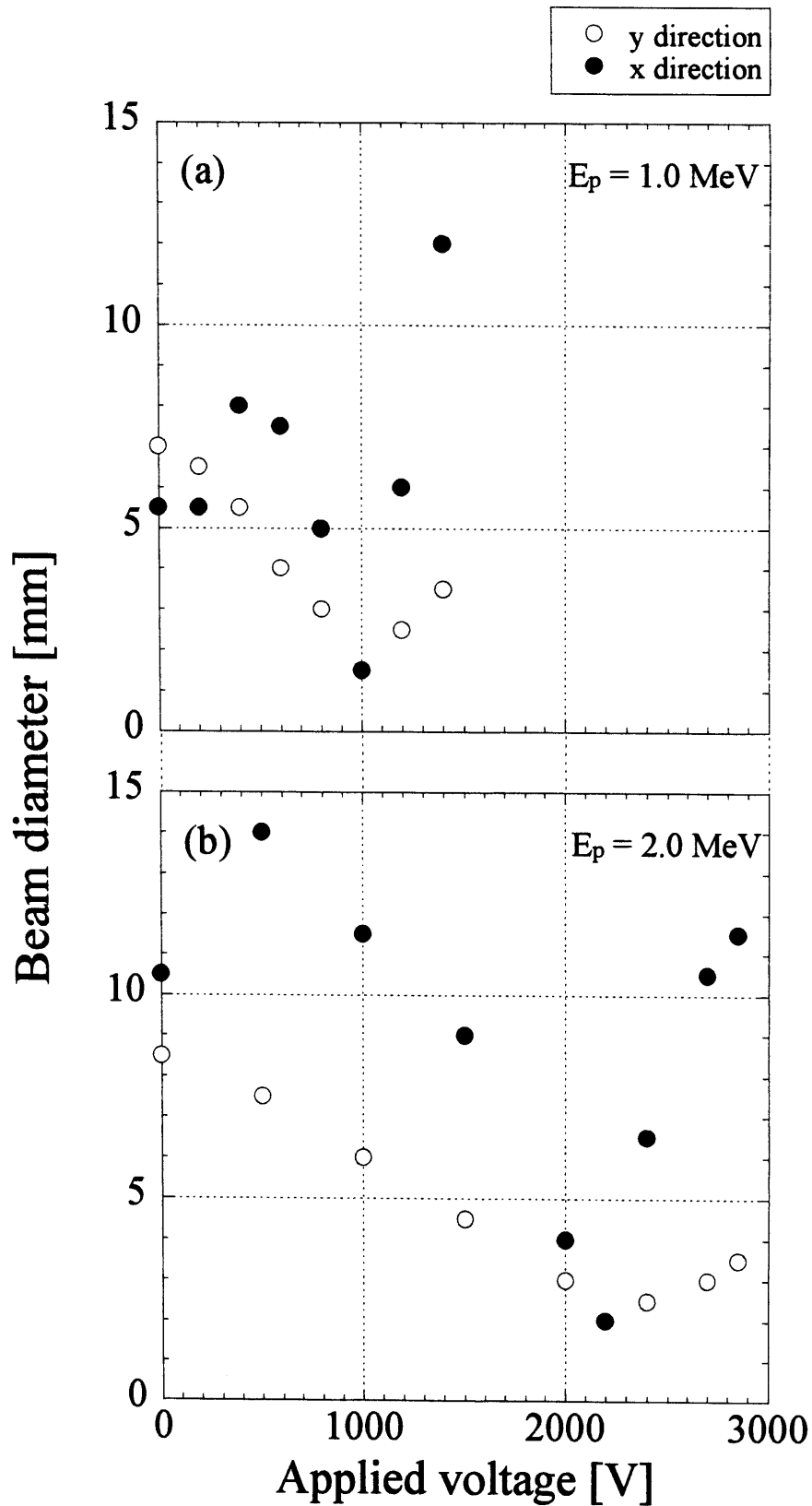


Fig. 10 The relationship between applied voltage and beam diameter with proton energy (a) 1.0 and (b) 2.0 MeV. Close and open circles show experiment results for x direction and y direction, respectively.

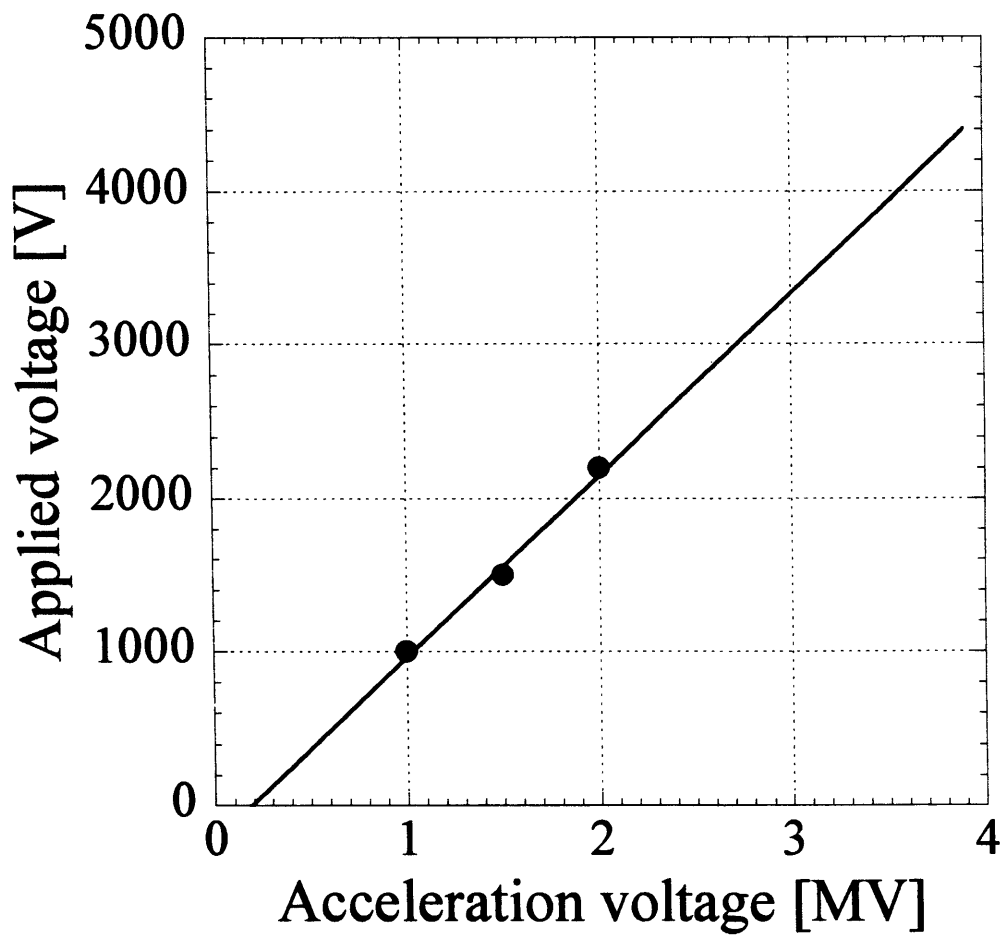


Fig. 11 The relationship between acceleration voltage and applied voltage.



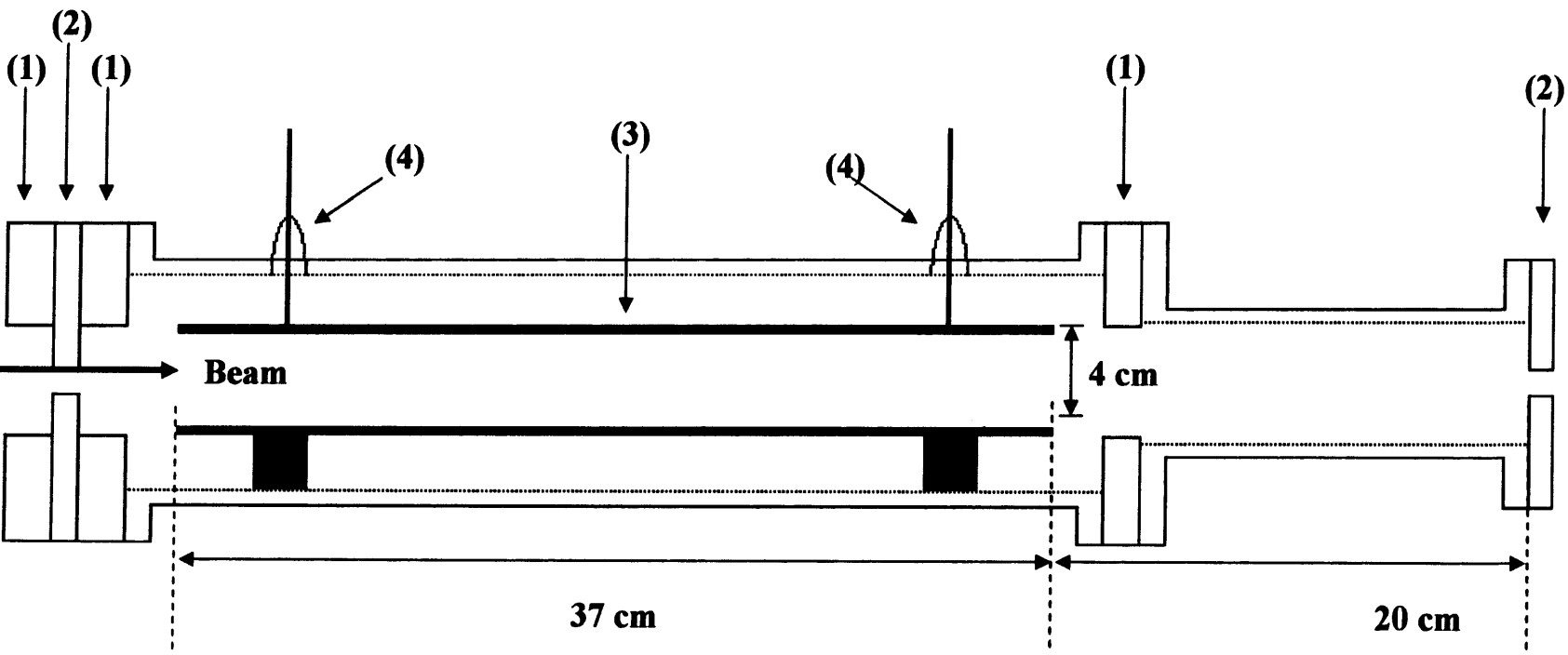


Fig. 12 Cross sectional view of a defector.

- (1) Acrylic flange
- (2) Water-cooled slit ( $\phi$  10 mm)
- (3) Electrode
- (4) Hermetic seal (glass)

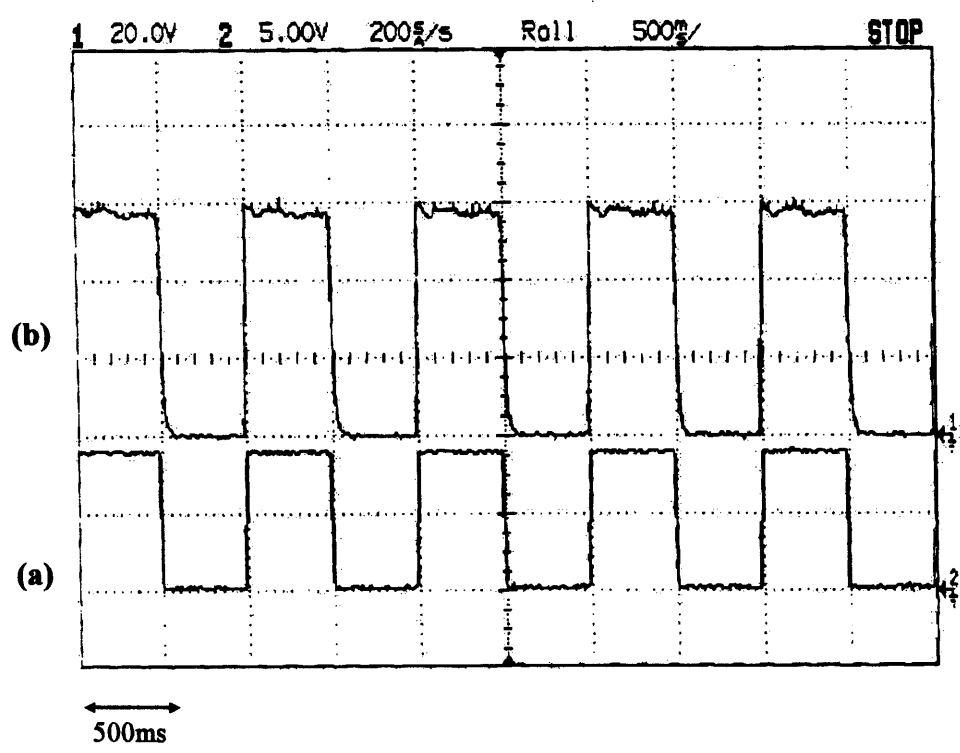


Fig. 13a Output signal of (a) the pulsed beam controller and (b) the high voltage power supply.

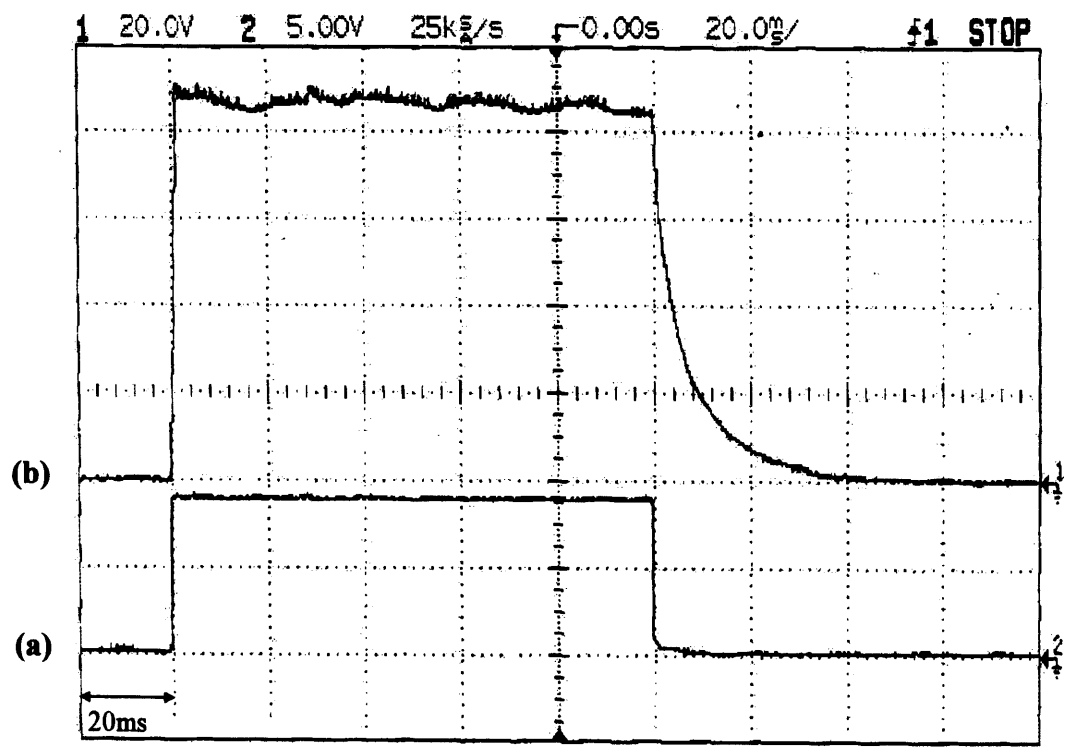


Fig. 13b Enlargement output signal of (a) the pulsed beam controller and (b) the high voltage power supply.

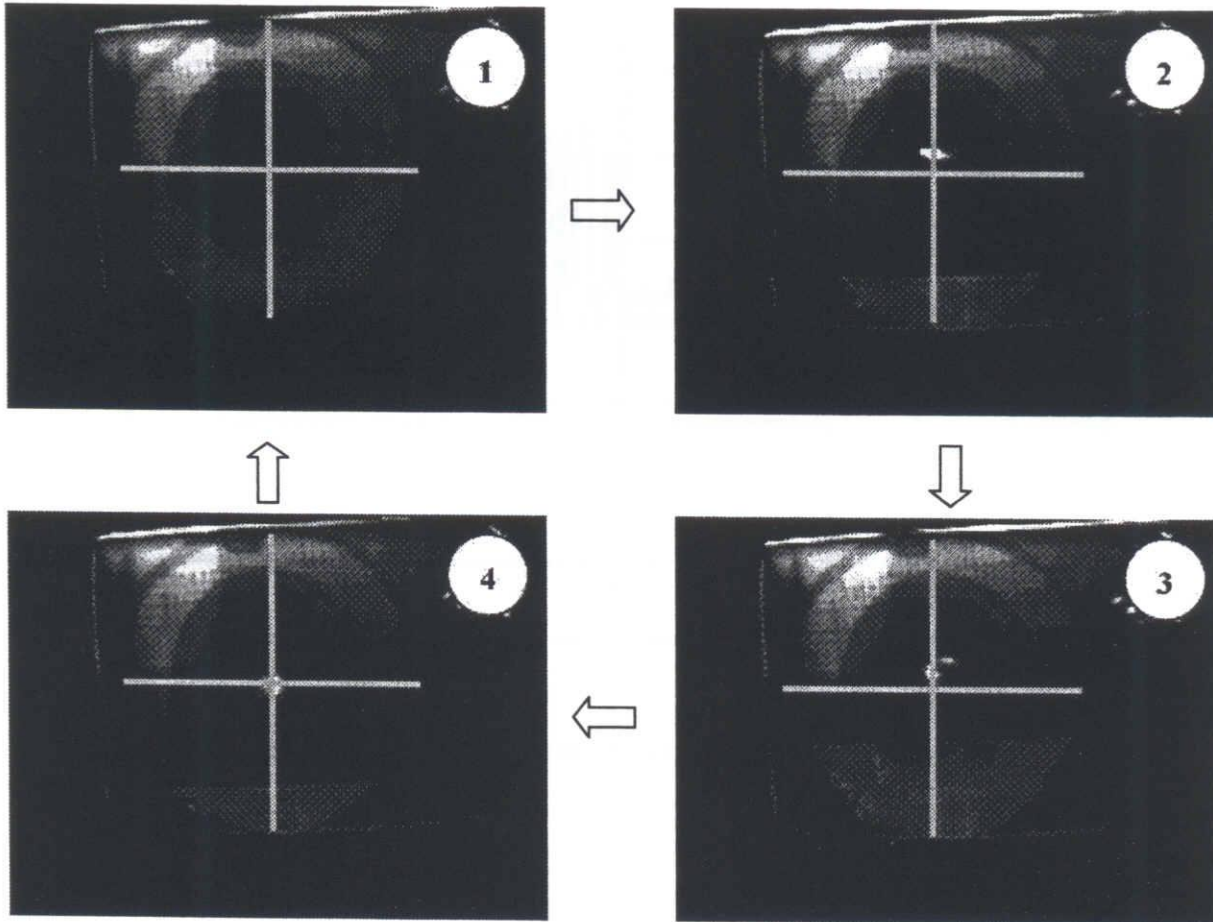


Fig. 14 Photographs of a quartz glass with 2.0 MeV proton beam.

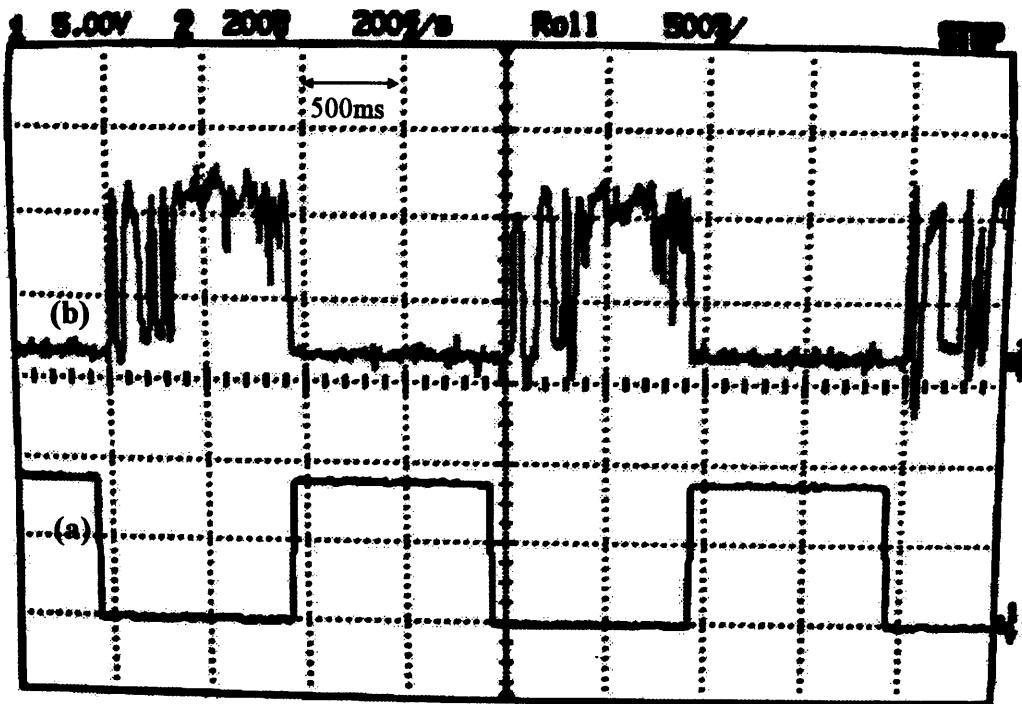


Fig. 15 Output signal of (a) the pulsed beam controller and (b) the beam current at the aluminum target.