

KEK 83- 1
April 1983
A

CHARACTERISTICS OF 6.5 GHz ECR ION SOURCE
FOR POLARIZED H⁻ ION SOURCE

(in Japanese)

Kiyoshi IKEGAMI, Yoshiharu MORI, Akira TAKAGI,
and Sadayoshi FUKUMOTO

NATIONAL LABORATORY FOR
HIGH ENERGY PHYSICS

© National Laboratory for High Energy Physics, 1983

KEK Reports are available from:

Technical Information Office
National Laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun,
Ibaraki-ken, 305
Japan

Phone: 0298-64-1171

Telex: 3652-534 (Domestic)

(0)3652-534 (International)

Cable: KEKOH0

CHARACTERISTICS OF 6.5 GHz ECR ION SOURCE

FOR POLARIZED H⁻ ION SOURCE

(in Japanese)

Kiyoshi Ikegami, Yoshiharu Mori, Akira Takagi
and Sadayoshi Fukumoto

National Laboratory for High Energy Physics
Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken, 305, Japan

Abstract

A 6.5 GHz ECR (electron cyclotron resonance) ion source has been developed for optically pumped polarized H⁻ ion source at KEK. The properties of this ECR ion source such as beam intensities, proton ratios, plasma electron temperatures and beam emittances were measured.

1. はじめに

KEKでは、1980年度より偏極ビームを加速するための前段加速器の建設が始まっている。そこで使用する偏極イオン源は現在開発中で、従来の原子線型の偏極イオン源とラムシフト型偏極イオン源のそれぞれの利点を合わせた、レーザーによる光ポンピング型偏極イオン源¹⁾である。これは大強度で性質の良いビームを作り出すことを目的としている。この装置の陽子発生源はECR (Electron Cyclotron Resonance)イオン源で、まず6.5 GHzのECRイオン源を使ったプロトタイプを開発し、既にビーム強度で10 μ Aの偏極H⁻ビームを得ている²⁾。また現在更に周波数の高い16 GHzのECRイオン源を使った偏極イオン源の開発を行っている。

レーザーによる光ポンピング型偏極イオン源は、Fig. 1に示すように4段階で構成される。装置図はFig. 2に示す。第1段階において、ECRイオン源を使用する以前はデュオプラズマトロンで陽子ビームを生成していた。しかしこの方式では、荷電交換時の減偏極を避ける為の強い磁場中に陽子ビームを入射する時に生ずるemittance blow-upによるビーム強度の減少を避けられないことがわかった³⁾。一方ECRイオン源では、強い磁場中にビームを直接引き出す為にこのblow-upの影響が少なく、またデュオプラズマトロンにおいてレーザー光を入射する為に必要なビーム軌道の偏向によるビーム強度の減少がなくなるなどの利点が見られる。次に第2段階の荷電交換部において、ナトリウム原子と陽子の荷電交換の衝突断面積は、陽子エネルギーが5 KeV付近で最大となり、およそ10⁻¹⁴ cm²であるから、ナトリウム原子密度を10¹³ Atom/cm²とすると陽子ビーム強度の10%程度のH⁰原子が得られる。またナトリウム原子の光ポンピングによる電子スピン偏極は、原子密度2 \times 10¹³ Atom/cm²において、偏極度60%の実験結果を得ている²⁾。第4段階において、ナトリウムによるH⁻への荷電交換の効率は8%程度である。これらの過程において、良い偏極度を得、より大強度のH⁻ビームを得るためには、光ポンピングの効率の向上とともにECRイオン源の性能が重要な点であり、その特性の十分な理解が必要である。以下ではこのECRイオン源の基本構成と実験結果を述べる。

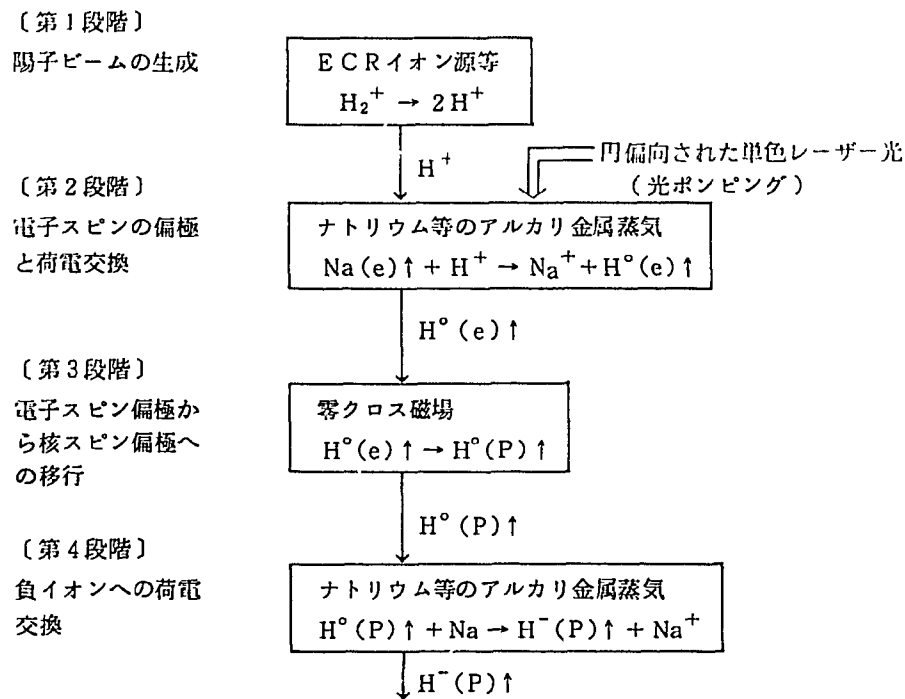


Fig. 1. 光ポンピング型偏極イオン源の構成

2. 6.5 GHz ECR イオン源

2-1 6.5 GHz ECR イオン源の構成

ECR イオン源は、マイクロ波放電を使用し電子サイクロトロン共鳴を利用してプラズマ中の電子を加熱する。このECR イオン源の装置を Fig. 3 に示した。マイクロ波キャビティの寸法は、長さ90mm、直径220mmの円筒形で、その両側に絶縁板を挟む形でソレノイドコイルを置いている。プラズマの閉じ込めは、そのソレノイドコイルによるミラー磁場で行われる。ビームの取り出しはキャビティを加速電位にして、ミラー磁場の一方に引き出し電極を取り付けることでイオンを引き出す。また他方から光ポンピング用のレーザー光を入射する。ソレノイドコイルは3分割しており、下流の2台の間からビーム引き出し電極の電圧を導入している。電子サイクロトロン共鳴は、 $f = eB/2\pi m$ よりマイクロ波を6.5 GHz に選んだ時、キャビティ中で2.3 k Gauss の磁場が必要である。またミラー比は2.3とした。Fig. 4 にソレノイドコイルの軸方向の磁場分布を示す。マイクロ波は3 kw のCWクライストロンにより、パルス幅200 μ s、繰り返し20 pps で1 kw のパワーをキャビティに厚さ1.6 mm のセラミック窓を通して給電される。Fig. 5 はマイクロ波システムのブロックダイアグラムである。

ビーム測定用のファラデーカップは口径10 mm で、引き出し電極より20 mm 離れた所に置いた。真空排気系は500 ℓ /s のターボモレキュラポンプを使用し、動作点での真空度はキャビティ部で 1×10^{-4} torr、チャンバー部で 2×10^{-6} torr であった。

2-2 プラズマ電子温度・密度の測定

ラングミュアプローブでECR イオン源のプラズマの電子温度・密度の測定を行った。測定に使用したプローブは、直径1.6 mm、先端長3 mm の丸型プローブで、キャビティの中心より30 mm 離れた所に設置した。

プローブ電位 V_p とそこに流れ込むプラズマからの電流 I_p の関係は、一般に Fig. 6 のようになる。図のA領域の電流 I_{es} は(1)式で示される。

$$I_{es} = \frac{1}{4} A n_e \langle v_e \rangle \quad \dots\dots\dots (1)$$

A : プローブ面積

(1)式の $\langle v_e \rangle$ はMaxwell分布をしたプラズマ中での電子の平均速度で、 $\langle v_e \rangle = (8KT_e/\pi m)^{1/2}$ である。次に図のB領域については、 $V_p - V_s = V_p'$ と置くと、電子密度 n_e' はボルツマン分布を仮定すると(2)式で示される。

$$n_e' = n_e \exp\left(\frac{eV_p'}{KT_e}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

従って電子電流 I_e は(3)式で示される。

$$I_e = I_{es} \exp\left(\frac{eV_p'}{KT_e}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

測定値 I_p は、一般には $I_e \gg I_i$ (イオン電流)から $I_p \approx I_e$ であるので(4)式で近似される。

$$I_p \approx I_{es} \exp\left(\frac{eV_p'}{KT_e}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に(4)式の両辺の対数をとって

$$\ln I_p \approx \text{const} + \frac{e(V_p - V_s)}{K T_e}$$

$e/K = 11604.2 [^\circ\text{K} \cdot \text{eV}^{-1}]$ であるから

$$\ln I_p \approx \text{const} + 11604.2 \times \frac{V_p [\text{V}] - V_s [\text{V}]}{T_e [^\circ\text{K}]}$$

これより $V_p - V_s$ に対する $\ln I_p$ の傾きをグラフにより求められる。⁴⁾ グラフ (Fig. 7) から電子温度 T_e はだいたい 10 eV ($1.2 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$) であると考えられる。

電子密度は電子温度がわかれば(2)式から求められる。しかしながらプラズマが磁場中に存在する場合は補正が必要である。⁵⁾ 補正前の電子密度を n_e' とすると磁場中の電子密度は(5)式で示される。

$$n_e = n_e' (1 + r_p) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで r_p は

$$r_p = \frac{3A}{16\pi} \times \frac{1}{(a_p + r_L) r_L}$$

$$r_L = \left(\frac{8KT_e}{\pi m} \right)^{1/2} \frac{m}{eB}$$

a_p : プローブ半径

ここで ECR 磁場 $B = 2.32 \text{ kGauss}$, プローブ表面積 $A = 17.1 \text{ mm}^2$, 電子温度 10 eV より電子密度 n_e は $1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ と考えられる。

2-3 ビームテスト

ECR イオン源のビーム引き出し系は、メッシュのある電極とない電極の2通りをテストした (Fig. 8)。メッシュのない電極でビームを引き出した時のイオン源の条件は、加速電圧 + 4.6 KV, 引き出し電圧 - 1.2 KV, キャビティーガス圧 $1.25 \times 10^{-4} \text{ torr}$ で、この時ソレノイド磁場中に設置した口径 10mm のファラデーカップでの測定イオン電流は 6 mA であった。次にビーム強度と水素ガス圧, 陽子比と水素ガス圧の関係を調べた。ビーム強度と水素ガス圧の関係は Fig. 10 で示した。キャビティーガス圧が $4 \times 10^{-5} \text{ torr}$ より下がるか $3 \times 10^{-3} \text{ torr}$ を越えるプラズマの不安定性によりビーム強度のふらつきが見られた。陽子比と水素ガス圧の関係は Fig. 11 で示した。 $1.4 \times 10^{-4} \text{ torr}$ のガス圧で 88% の陽子比を得ている。メッシュ付きの引き出し電極では、加速電圧 + 3.4 KV, 引き出し電圧 - 200V, キャビティーガス圧 $1.7 \times 10^{-4} \text{ torr}$ の条件で、ソレノイド磁場中のファラデーカップでメッシュなしの場合の約 2 倍の 13.5 mA のイオン電流を得た (Fig. 9)。なおこれらのガス圧測定は B-A 電離真空計を用いており、ECR イオン源のソレノイドコイルの漏れ磁場の影響を受けている。従ってガス圧の測定は磁場の設定を一定にして行った。

次にエミッタンスの測定を行った。エミッタンス測定器は、現在 K E K 前段加速器で用いているエミッタンスモニター⁶⁾を改良して使用した。エミッタンスの信号は、データプロセッサで平均化処理したものを、輝点

の集合としてオシロスコープ上にエミッタンス位相面を表わした。そのブロックダイアグラムを Fig. 12 に示す。エミッタンスの測定結果はメッシュ付きの引き出し系で、最大ピーク信号の 90% で切った時の値に $\beta\gamma$ を掛けた規格化エミッタンスで $0.72\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であった。またメッシュのない電極でのエミッタンスはアベレージョンが多く見られ、規格化エミッタンスは $0.9\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であった (Fig. 13)。ここでエミッタンス位相面の切る割合を変えて見た。その時のエミッタンスは、90% で $0.66\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の時、75% で $0.31\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、50% で $0.16\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、25% で $0.08\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であった (Fig. 14)。

3. まとめ

偏極イオン源では、ナトリウムセル中でイオンビームが中性ビームに荷電交換されるために、ナトリウムセルまでのイオンビームの性質が重要である。ECR イオン源ではナトリウムセルを通過するイオンビームは細く、イオン電流密度 $8.3\text{mA}/\text{cm}^2$ とデュオプラズマトロン方式の 4 倍以上の電流密度を得ている。このことはレーザー光の光子密度を高くでき、なおかつソレノイド磁場の中心を通ることで縦方向の磁場成分による減偏極がおさえられる。また運転において、ナトリウム蒸気による電極等の汚れが少なくなり、同時にナトリウム補給回数を減らせる。エミッタンスは $\beta\gamma$ を掛けた規格化エミッタンスで $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下と小さな値である。これは電子サイクロトロン共鳴によりプラズマを得ていることで、イオン温度が上がらないためと考えられる。このことはナトリウムセルを通過した後、 H^- に荷電交換するまで中性ビームとして損失なく走らすための重要な条件である。

ところでこの ECR イオン源でまだ不十分な所は、6.5 GHz の ECR 条件では電子スピン偏極から核スピン偏極に移るための磁場が低いことである。そこで 16 GHz のマグネトロンを使用した新しい ECR イオン源の実験を行っている。その時の ECR 条件は 6 kGauss で、ミラー比を 2 とするとビーム引き出しの所の磁場は 10 kGauss 以上とすることができる。この磁場では、減偏極は 20% 程度と考えられ、現在の 50% に比べて大きく改善されるものと期待される。

References

- 1) Y. Mori, K. Ikegami, A. Takagi and S. Fukumoto : Proc. of the 5th International Symposium on High Energy Spin Physics, BNL, 16-22 Sept. 1982, U.S.A
- 2) Y. Mori, K. Ikegami, A. Takagi and S. Fukumoto : Proc. 6th Symposium on Ion Sources and Ion-Assisted Technology, P 97 (1982)
- 3) Y. Mori, K. Ito, A. Takagi and S. Fukumoto : IEEE, NS 28, No 3, 2690 (1981)
- 4) 武田進：プラズマの基礎 朝倉書店 1971 増版
- 5) F. F. Chen : in Plasma Diagnostic Techniques, ed. by R. H. Huddlestone and S. L. Leonard (Academic Press, 1965)
京都大学工学部イオン工学実験施設：イオン源工学テキスト 1978
- 6) K. Ito, T. Sakaue, H. Ishimaru and S. Fukumoto : ISAT' 78, The Institute of Electrical Engineers of Japan 16-18 Feb. P 71 (1978)

KEK POLARIZED H^- ION SOURCE

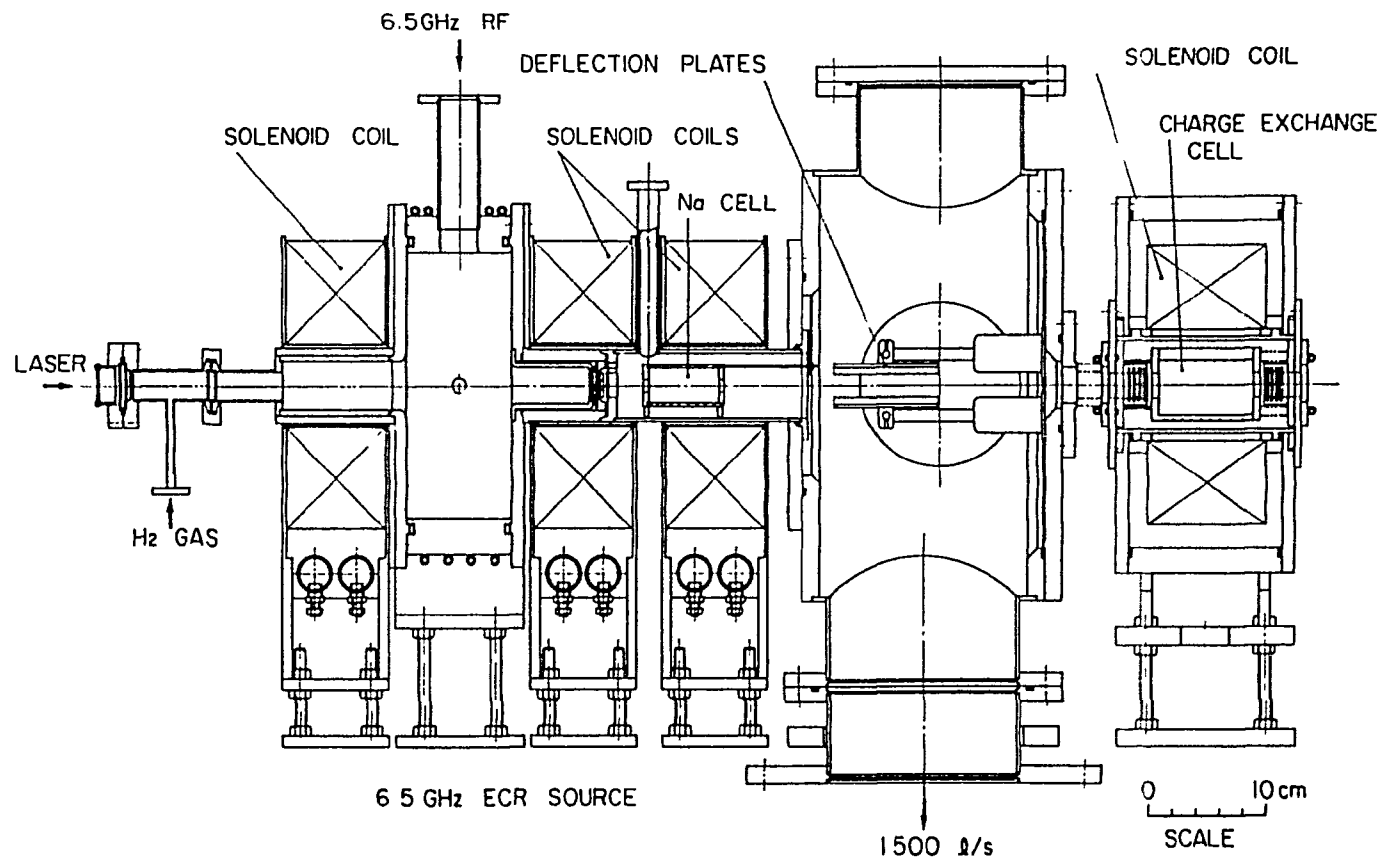


Fig. 2 Schematic set-up of optically polarized H^- ion source using 6.5 GHz ECR ion source.



Fig. 3 Photograph of 6.5 GHz ECR ion source.

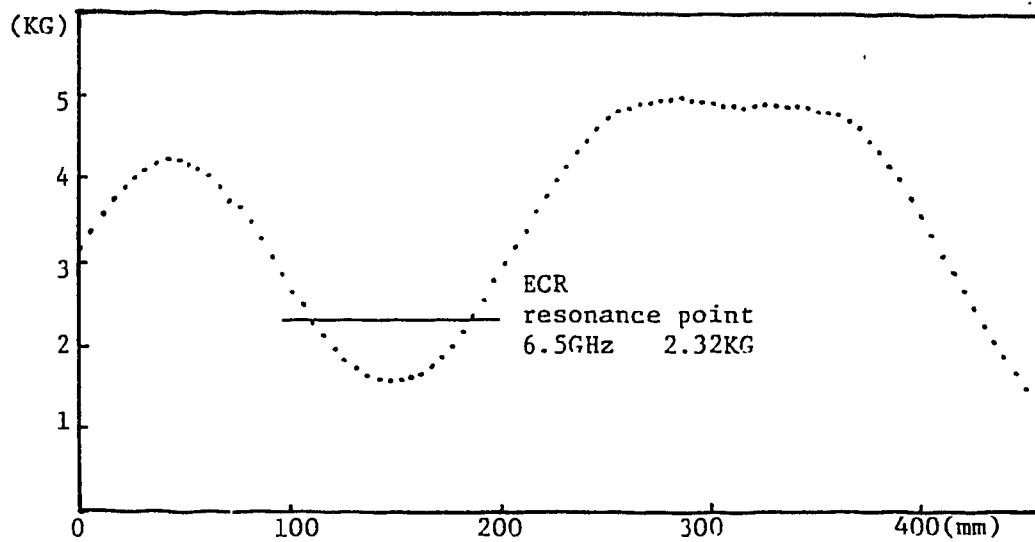


Fig. 4 Profile of the magnetic field of ECR ion source.

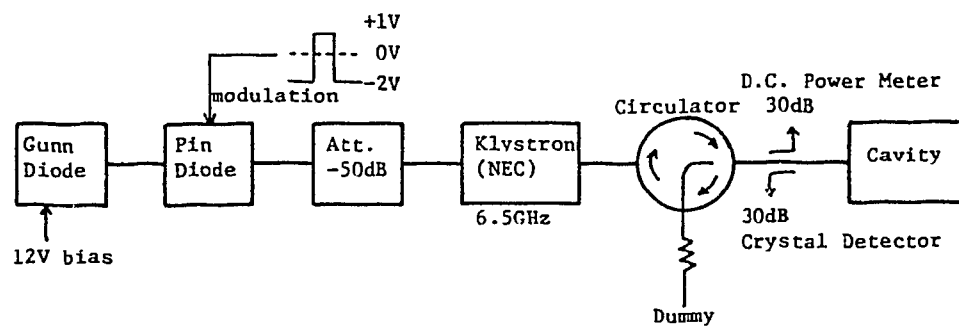


Fig. 5 6.5 GHz microwave system for ECR ion source.

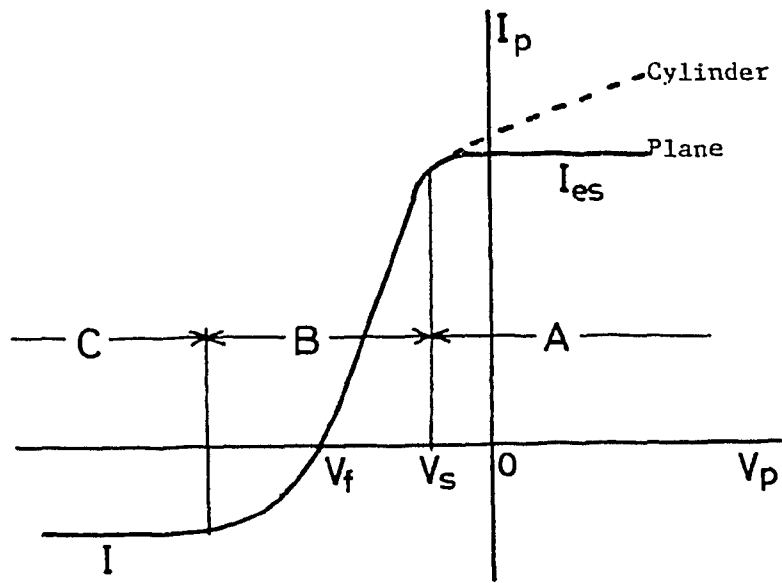


Fig. 6 Schematic of I_p - V_p curve of Langmuir probe.

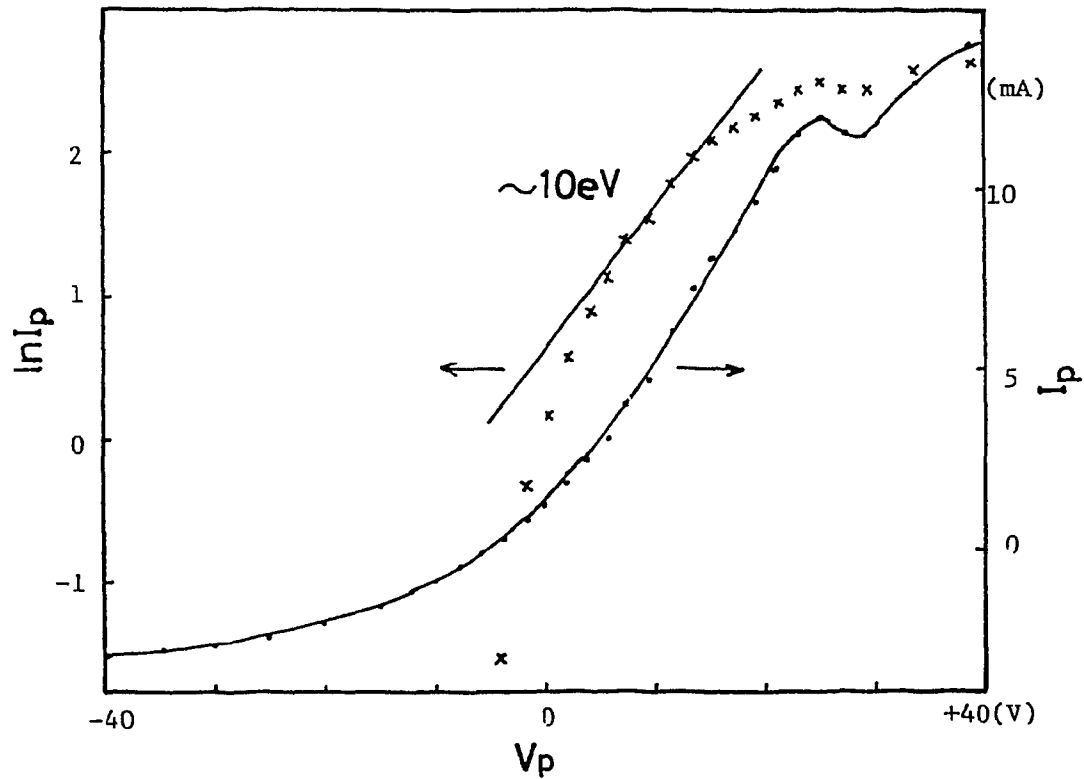


Fig. 7 Measured I_p - V_p curve for 6.5 GHz ECR plasma.

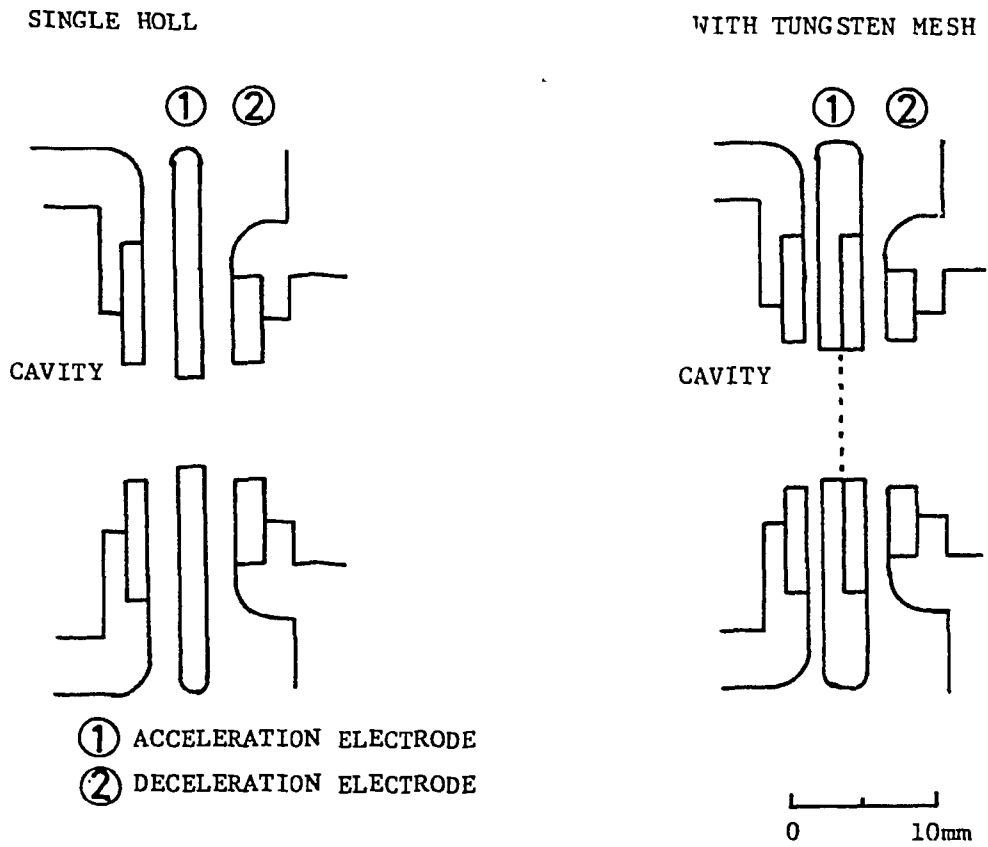
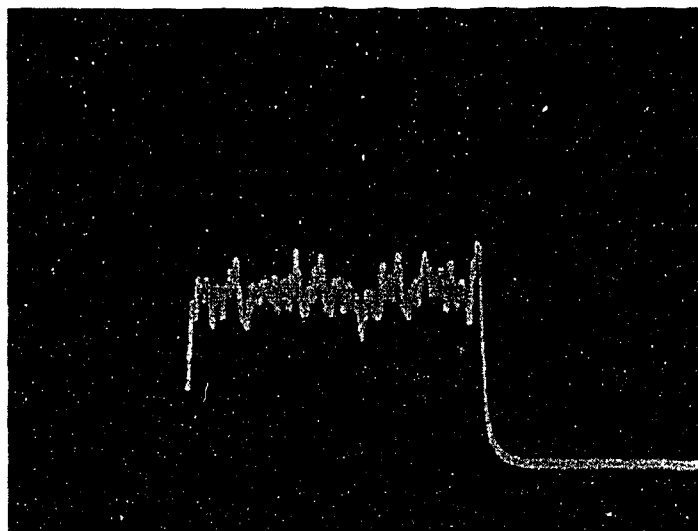


Fig. 8 Configurations of beam extraction system.



5mA/div

50 μ s/div

I=13.5mA

Fig. 9 Beam profile from 6.5 GHz ECR ion source.

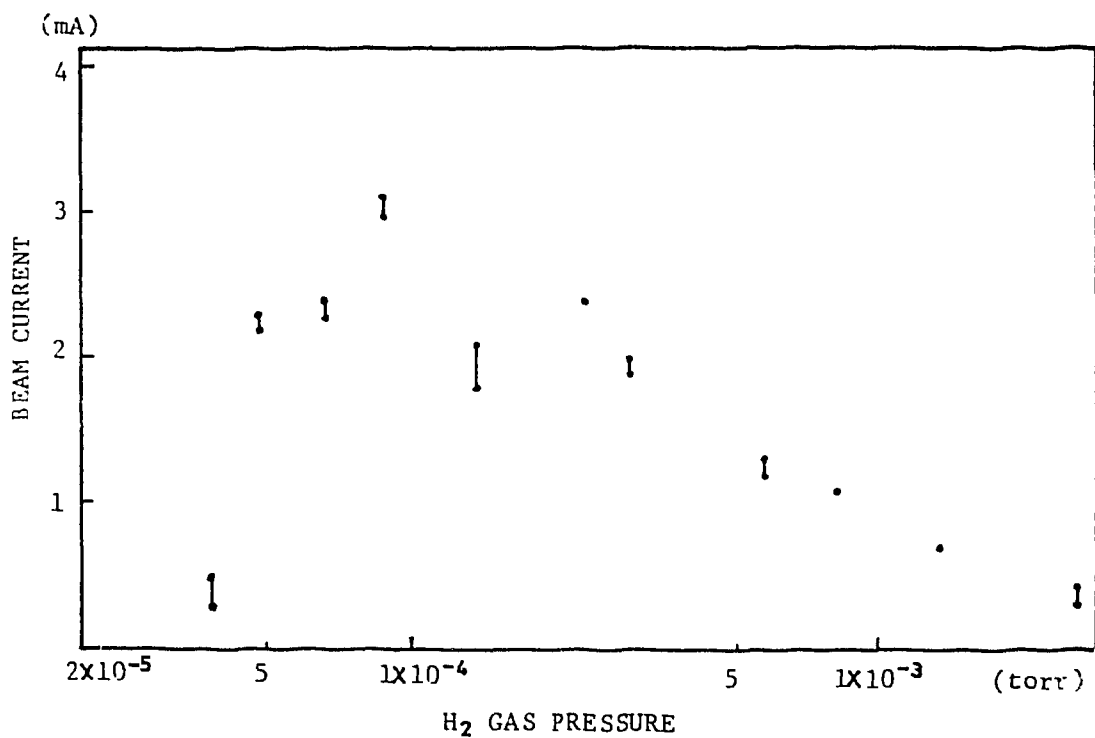


Fig. 10 Variations of beam current as a function of H₂ gas pressure in the discharge cavity.

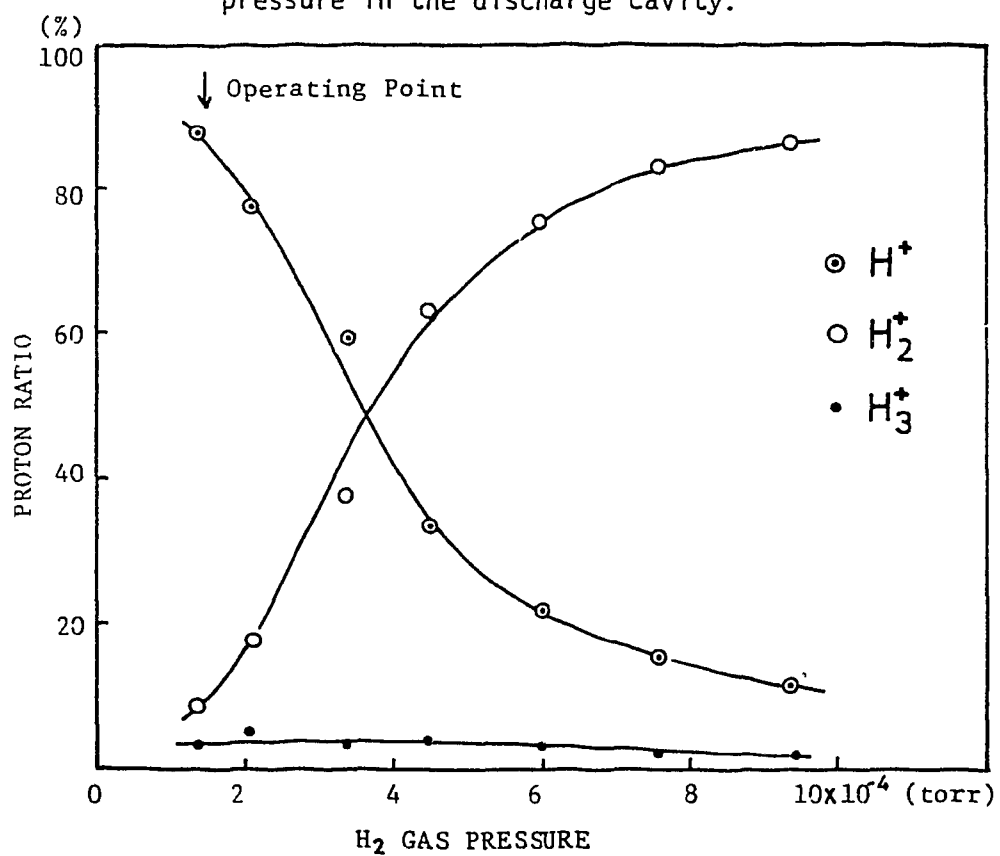


Fig. 11 Fractions of ion species (H⁺, H₂⁺ and H₃⁺) in the extracted beam.

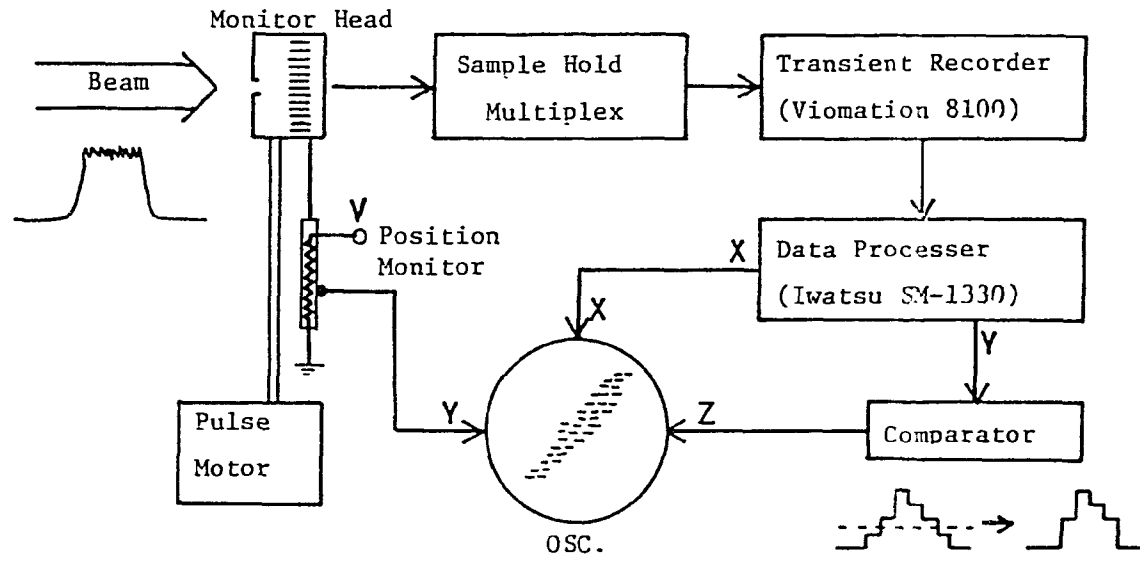
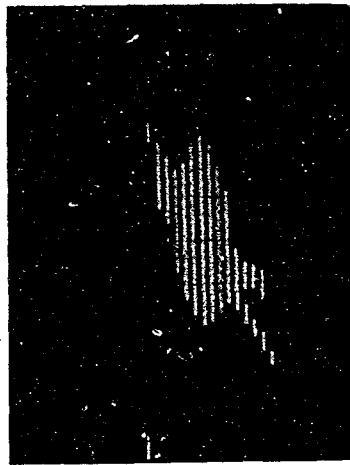
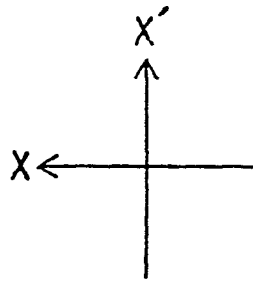


Fig. 12 Schematic set-up for emittance measurement.



WITH TUNGSTEN MESH

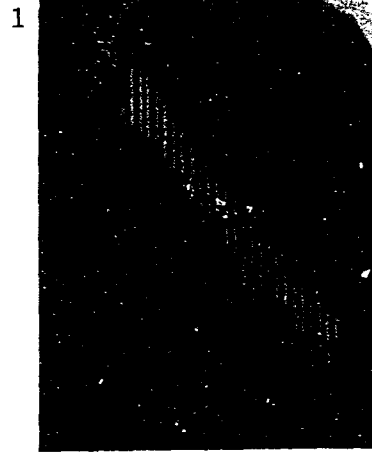
$$\epsilon = 0.72\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$



SINGLE HOLE

$$\epsilon = 0.9\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

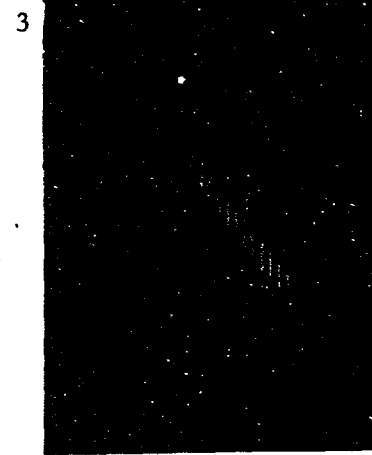
Fig. 13 Measured beam emittances for two different types of beam extraction system.



1



2



3

1. 90%EMITTANCE

$$\epsilon = 0.66\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

2. 75%EMITTANCE

$$\epsilon = 0.31\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

3. 50%EMITTANCE

$$\epsilon = 0.16\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

Fig. 14 90%,75% and 50% beam emittances of ECR ion source.