

JAERI-M
90-219

負イオン電流測定用プローブの開発と
初期実験結果

1990年12月

渡辺 和弘・井上多加志・小島 啓明
松田 恭博*・奥村 義和

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

負イオン電流測定用プローブの開発と初期実験結果

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

渡辺 和弘・井上多加志・小島 啓明

松田 恭博*・奥村 義和

(1990年11月16日受理)

負イオン源から引き出し得る負イオン電流を簡易的に測定するための負イオンプローブを開発し、その初期実験を行なった。このプローブは原研で開発された負イオン源加速電極の単一孔の概念に基づいて設計されたものであり、水冷された同軸状銅製パイプの先端に取り付けられたプラズマ電極、電子抑制用磁石とフィンを有した引き出し電極、負イオン捕集カップから構成されている。まずはじめに超小型負イオン源の負イオン電流を測定し、ビーム引き出し時に熱的に測定された負イオン電流値と比較し両者が良い一致を示すことを確認した。さらにECRイオン源において負イオン電流を測定した。これらの結果、本プローブが各種イオン源における負イオン電流の比較や負イオンの空間分布の測定に有効であることが確認できた。

Development of a Negative Ion Measurement Probe
and Initial Results of Experiments

Kazuhiro WATANABE, Takashi INOUE, Hiroaki KOJIMA
Yasuhiro MATSUDA* and Yoshikazu OKUMURA

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 16, 1990)

A negative ion probe for the measurement of extractable negative ion current in a plasma has been developed and tested. This probe was designed in accordance with the single aperture of the negative ion source accelerator developed at JAERI. The probe consists of a plasma electrode, an extraction electrode in which a pair of permanent magnet is inserted for the electron suppression, and an ion collective cup. At first, we confirmed the accuracy of the measurement by comparing the measured value with the H^- current actually extracted in a small negative ion source. Then the negative ion current in the ECR ion source was measured. After these experiment, it was confirmed that the probe is effective for comparing the extractable negative ion current in various ion sources and for the measurement of spatial distribution of negative ions in a plasma.

Keywords: Negative Ion, Probe, Ion Source, H^- Current, Accelerator,
ECR Ion Source, NBI

* On leave from Nissin Electric Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. プローブの構造と測定方法	1
3. 測定結果	2
4. 考察	4
5. おわりに	5
謝辞	5
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of the probe and experimental procedure	1
3. Experimental results	2
4. Discussion	4
5. Summary	5
Acknowledgment	5
References	6

1. はじめに

次期核融合装置プラズマの加熱および電流駆動の手段として高エネルギー中性粒子ビーム入射装置 (NBI) が有望視されている。この装置には 500~1000 keV のエネルギーで数十アンペア出力の負イオン源が必要である¹⁾。このような目標に向かって、現在各国で大電流負イオン源の開発が行われている²⁾³⁾⁴⁾。負イオン源からの負イオン電流の測定方法としては、負イオン源プラズマ生成部から負イオン引き出しのための電極によって電子と負イオンを引き出し、その後電子のみを磁場等によって分離し、負イオン電流のみを電氣的あるいは熱的に測定しているのが一般的である。しかし、この方式ではビーム加速のためのイオン源加速部や大がかりな電源システムが必要である。さらに、それらのビーム加速電極とプラズマ生成部との位置関係は予め決められ、特に負イオン生成部に対するビーム引出し位置などの負イオン源開発に於ける重要なパラメータサーベイの自由度が制限されることが多い。従って、イオン源の改良や異なった方式のイオン源を各種製作し試験する場合、或はイオン源に於ける負イオン生成の空間分布等を測定する際には、より簡便な負イオン電流の測定方法が必要である。この要求を満足させる目的で比較的容易に負イオン電流を測定できるプローブを製作した。本報告では、このプローブ (JAERI プローブと呼ぶ) の構造及び初期測定結果について報告する。

2. プローブの構造と測定方法

第1図に負イオン測定プローブの構造概略図を示す。このプローブは負イオン源加速部の一個のビーム引き出し孔の構造⁵⁾に基づいている。プローブ先端部の詳細図を同図に示す。電極部は外側からプラズマ電極、引き出し電極、負イオン捕集カップの三種類の電極から構成されており、各電極は各々直流 5 kV の絶縁が施されている。各電極の電圧はプローブのもう一方の端に設けられた電流導入端子から供給される。プラズマ電極には直径 4 mm の円孔が設けられており、引き出し電極も直径 4 mm である。これら 3 種の電極は各々純水で冷却された同軸状パイプに取り付けられている。従って、同軸パイプ部は三重管構造であり計 6 本のパイプから構成されている。引き出し電極には電子偏向用の永久磁石が取り付けられている。第2図に測定の際の電源回路図を示す。プラズマ電極と引き出し電極間に印加される引き出し電源の 5 kV 以下の電圧によってプラズマ中から負イオンおよび電子が引き出される。引き出された電子は引き出し電極に取り付けられた磁石によるダイポール磁場によって偏向され、引き出し電極自身に流入する。引き出し電極の下部に設けられたフィンは、引き出し電極で反射した電子や電極からの二次電子を捕獲し引き出し電極と負イオン捕集カップ間の加速電界中に流入させないためのものであり、負イオン源加速部において引き出し電極電位と同電位で用いる場合の電子抑制電極と同様に電子抑制の効果をねらったものである。負イオン捕集カップには、負イオン加速のための電圧 (5 kV 以下) が印加され、負イオンは引き出し電極の磁場によってほ

1. はじめに

次期核融合装置プラズマの加熱および電流駆動の手段として高エネルギー中性粒子ビーム入射装置 (NBI) が有望視されている。この装置には 500~1000 keV のエネルギーで数十アンペア出力の負イオン源が必要である¹⁾。このような目標に向かって、現在各国で大電流負イオン源の開発が行われている²⁾³⁾⁴⁾。負イオン源からの負イオン電流の測定方法としては、負イオン源プラズマ生成部から負イオン引き出しのための電極によって電子と負イオンを引き出し、その後電子のみを磁場等によって分離し、負イオン電流のみを電氣的あるいは熱的に測定しているのが一般的である。しかし、この方式ではビーム加速のためのイオン源加速部や大がかりな電源システムが必要である。さらに、それらのビーム加速電極とプラズマ生成部との位置関係は予め決められ、特に負イオン生成部に対するビーム引出し位置などの負イオン源開発に於ける重要なパラメータサーベイの自由度が制限されることが多い。従って、イオン源の改良や異なった方式のイオン源を各種製作し試験する場合、或はイオン源に於ける負イオン生成の空間分布等を測定する際には、より簡便な負イオン電流の測定方法が必要である。この要求を満足させる目的で比較的容易に負イオン電流を測定できるプローブを製作した。本報告では、このプローブ (JAERIプローブと呼ぶ) の構造及び初期測定結果について報告する。

2. プローブの構造と測定方法

第1図に負イオン測定プローブの構造概略図を示す。このプローブは負イオン源加速部の一個のビーム引き出し孔の構造⁵⁾に基づいている。プローブ先端部の詳細図を同図に示す。電極部は外側からプラズマ電極、引き出し電極、負イオン捕集カップの三種類の電極から構成されており、各電極は各々直流 5 kV の絶縁が施されている。各電極の電圧はプローブのもう一方の端に設けられた電流導入端子から供給される。プラズマ電極には直径 4 mm の円孔が設けられており、引き出し電極も直径 4 mm である。これら3種の電極は各々純水で冷却された同軸状パイプに取り付けられている。従って、同軸パイプ部は三重管構造であり計6本のパイプから構成されている。引き出し電極には電子偏向用の永久磁石が取り付けられている。第2図に測定の際の電源回路図を示す。プラズマ電極と引き出し電極間に印加される引き出し電源の 5 kV 以下の電圧によってプラズマ中から負イオンおよび電子が引き出される。引き出された電子は引き出し電極に取り付けられた磁石によるダイポール磁場によって偏向され、引き出し電極自身に流入する。引き出し電極の下部に設けられたフィンは、引き出し電極で反射した電子や電極からの二次電子を捕獲し引き出し電極と負イオン捕集カップ間の加速電界中に流入させないためのものであり、負イオン源加速部において引き出し電極電位と同電位で用いる場合の電子抑制電極と同様に電子抑制の効果をねらったものである。負イオン捕集カップには、負イオン加速のための電圧 (5 kV 以下) が印加され、負イオンは引き出し電極の磁場によってほ

とんど曲げられることなくこのカップに流入する。

本プローブの設計に当たっては、2次元及び3次元の軌道計算コード⁶⁾によって、負イオンビームが集束良くカップに流入する様電極構造や配置を決めた。その一例を第3(1)、3(2)図に示す。第3(1)図は2次元の軌道計算例であり、電子は考慮していない。この場合の電極の電圧はプラズマ電極と引き出し電極間が2 kV、引き出し電極と負イオン捕集カップ間が3 kVである。負イオンビームは集束良くカップに入射していることがよくわかる。さらに、電子を含めた3次元コードによるシミュレーションの結果である第3(2)図からは、電子は引き出し電極部の磁場によって偏向抑制され、負イオンのみがカップに入射していることがわかる。各電極間の電圧は第3(1)図の場合と同じである。

3. 測定結果

第4図に超小型負イオン源について本負イオンプローブを用いて負イオン電流を測定した結果を示す。アーク放電電圧が60 Vで電流が3 Aと8 Aの2ケースについて示してある。この場合には負イオン捕集カップの電圧を4 kV一定とし、引き出し電圧を順次0 Vから3.5 kVまで上げた場合の各電極の電流の変化を示してある。カップ電流の変化に注目すると、ある引き出し電圧においてカップ電流が一度飽和する傾向を示すが、さらに引き出し電圧を上昇させるとカップ電流が再び増加している。この原因は、引き出し電圧の小さい領域ではカップに負イオン電流のみが到達しているが引き出し電圧を大きくすると、引き出し電極より下流に流れ出す電子電流が増え、カップにも電子が入ってくるためである。この詳細については後で述べる。従って、電流変化曲線の変極点付近が最大負イオン電流である。アーク電流が3 Aの場合には約105 μ Aであり、電流密度で0.8 mA/cm²である。また、アーク電流8 Aにおいては約200 μ Aであり、電流密度で1.6 mA/cm²となっている。第5図に、小型負イオン源から負イオンビームを引き出し、熱的に負イオン電流を測定した場合のアーク放電電流に対する負イオン電流の変化を示す。このデータにおいてはアーク電流が10 A以上でしか測定されていないため、それ以下の電流領域を同図より外挿すると、アーク電流が3 Aで負イオン電流が約0.8 mA/cm²、アーク電流が8 Aで負イオン電流が約1.9 mA/cm²となる。第4図の場合と第5図の場合のイオン源の動作ガス圧力に違いがあるが、アーク電流の小さい領域においては負イオン電流はガス圧力に殆ど依存しないので、負イオンプローブで測定した電流値は、ビームを引き出し熱的に測定したビーム電流に良い一致を示していると言える。これによって、負イオンプローブによる測定の信頼性が確認された。

次に、2.45 GHzのマイクロ波をミラー磁場配位のチェンバーに入射して生成したECRプラズマ中の負イオン電流測定の初期実験を本負イオンプローブを用いて行なった。このECRイオン源⁷⁾においては、プラズマの径方向のある位置において体積生成型負イオン源と同様なプラズマパラメータが得られており、そこでの負イオンの存在が期待されているものである。ECRイオン源に本プローブを挿入したときの構成図を第6図に示す。

第7図にプローブによる測定結果の一例を示す。マイクロ波の入射電力は0.8 kWである。プ

とんど曲げられることなくこのカップに流入する。

本プローブの設計に当たっては、2次元及び3次元の軌道計算コード⁶⁾によって、負イオンビームが集束良くカップに流入する様電極構造や配置を決めた。その一例を第3(1)、3(2)図に示す。第3(1)図は2次元の軌道計算例であり、電子は考慮していない。この場合の電極の電圧はプラズマ電極と引き出し電極間が2 kV、引き出し電極と負イオン捕集カップ間が3 kVである。負イオンビームは集束良くカップに入射していることがよくわかる。さらに、電子を含めた3次元コードによるシミュレーションの結果である第3(2)図からは、電子は引き出し電極部の磁場によって偏向抑制され、負イオンのみがカップに入射していることがわかる。各電極間の電圧は第3(1)図の場合と同じである。

3. 測定結果

第4図に超小型負イオン源について本負イオンプローブを用いて負イオン電流を測定した結果を示す。アーク放電電圧が60 Vで電流が3 Aと8 Aの2ケースについて示してある。この場合には負イオン捕集カップの電圧を4 kV一定とし、引き出し電圧を順次0 Vから3.5 kVまで上げた場合の各電極の電流の変化を示してある。カップ電流の変化に注目すると、ある引き出し電圧においてカップ電流が一度飽和する傾向を示すが、さらに引き出し電圧を上昇させるとカップ電流が再び増加している。この原因は、引き出し電圧の小さい領域ではカップに負イオン電流のみが到達しているが引き出し電圧を大きくすると、引き出し電極より下流に流れ出す電子電流が増え、カップにも電子が入ってくるためである。この詳細については後で述べる。従って、電流変化曲線の変極点付近が最大負イオン電流である。アーク電流が3 Aの場合には約105 μ Aであり、電流密度で0.8 mA/cm²である。また、アーク電流8 Aにおいては約200 μ Aであり、電流密度で1.6 mA/cm²となっている。第5図に、小型負イオン源から負イオンビームを引き出し、熱的に負イオン電流を測定した場合のアーク放電電流に対する負イオン電流の変化を示す。このデータにおいてはアーク電流が10 A以上でしか測定されていないため、それ以下の電流領域を同図より外挿すると、アーク電流が3 Aで負イオン電流が約0.8 mA/cm²、アーク電流が8 Aで負イオン電流が約1.9 mA/cm²となる。第4図の場合と第5図の場合のイオン源の動作ガス圧力に違いがあるが、アーク電流の小さい領域においては負イオン電流はガス圧力に殆ど依存しないので、負イオンプローブで測定した電流値は、ビームを引き出し熱的に測定したビーム電流に良い一致を示していると言える。これによって、負イオンプローブによる測定の信頼性が確認された。

次に、2.45 GHzのマイクロ波をミラー磁場配位のチェンバーに入射して生成したECRプラズマ中の負イオン電流測定の初期実験を本負イオンプローブを用いて行なった。このECRイオン源⁷⁾においては、プラズマの径方向のある位置において体積生成型負イオン源と同様なプラズマパラメータが得られており、そこでの負イオンの存在が期待されているものである。ECRイオン源に本プローブを挿入したときの構成図を第6図に示す。

第7図にプローブによる測定結果の一例を示す。マイクロ波の入射電力は0.8 kWである。プ

ラズマ源の動作ガス圧力はピラニゲージ続きで20m Torrとした。プローブ先端の位置つまり測定位置はプラズマチェンバーの中心から径方向に4 cm の点である。図は負イオン捕集電極カップに5 kV 一定の電圧を印加し、引出し電極電圧を500 V から4 kV まで順次上げていった場合の、引出し電極電流およびカップ電流の変化を表している。カップ電流は引出し電圧が3 kV 程度までの低い範囲ではほぼ直線的に増加している。この実験ではカップの電圧を一定とし引き出し電圧を徐々に上げて測定したため、各測定点でのビームの光学的形状が異なっている。このため電流が引き出し電圧に対して2分の3乗則に従う⁹⁾領域が非常に狭いものと考えられる。引き出し電圧が3 kV を超えるとカップ電流は飽和する傾向にある。これはプラズマ源内の負イオンの生成量が飽和しているためと考えられる。ここで、引き出し電圧をさらに上げるとカップ電流は僅かではあるが増加している。これは引き出し電圧を上げたためにカップに電子電流が流入しているためである。この現象を明らかにするために、水素プラズマの代わりにヘリウムプラズマを用いて、引出し特性を取得した。この理由は、ヘリウムの場合には負イオンが生成されないので、各電極に流入する電子の量について把握できるからである。ヘリウムプラズマにおいても、引き出し部での空間電荷の効果を水素プラズマの場合に近づけるため、引出し電流が水素の場合とほぼ同じかあるいは幾分高くなるようにガス圧力、入射電力を調整した。図からわかるとおり、引き出し電圧が3 kV 程度より高くなるとヘリウムの場合でもカップ電流が急激に増加しており、電子が引き出し電極からカップ側へ漏れてくることがわかる。このことは水素プラズマから負イオンを引き出す場合にも、引き出し電圧の高いところではカップに電流が流入しその量が無視できないことを意味している。従って、水素の場合のカップ電流からヘリウムの場合のカップ電流つまり電子電流分を引いた値がほぼ負イオン電流である。図中でカップ電流曲線の下部の破線で示した曲線が電子電流分を差し引いたイオン電流である。飽和した値で約330 μ A であり、電流密度で2.6 mA/cm²に相当する。

同様な測定により負イオン電流のチェンバー径方向分布を測定した結果が、第8図である。負イオンはチェンバー中心から5 cm の点から外側に関して測定した10 cm の点まで直線的に減少している。そして5 cm よりも内側では飽和する傾向が見られる。さらに内部の測定を試みたがプローブへの許容印加電圧範囲でカップ電流が飽和せず測定できなかった。また、引き出し電極電流も大きく、電極の熱負荷も増加しプローブを損傷させる恐れがあるので、プラズマ電極の孔の孔径を4 mm から2 mm のもに変更した。さらに引き出し部の電界を充分高くできるようにプラズマ電極の孔部の厚みを薄くした。

第9図にミラー磁場生成用電磁石コイルの電流に対する負イオン電流の変化の様子を示す。チェンバー中心部から5 cm の点での測定結果である。磁場コイル電流としては約75 A が最適であることがわかる。但し、この点におけるカップ電流は測定範囲で飽和しなかった。従って、図中の点は実験範囲内で得られた最大の電流値を意味する。このようにコイル電流、つまりミラー磁場の強度によって負イオン電流が変化するのは、ミラー磁場が負イオン源の磁気フィルターと等価な役割を果たしており、磁場コイル電流が75 A の時に負イオン生成にとって最も適した磁気フィルターの条件が形成されているものと考えられる。

さらに、ECRプラズマ源において負イオンが生成されているという証拠を提供するもう一つの結果を第10図に示す。この図は引き出し電圧をパラメータとして、負イオン捕集カップの

電圧を引き出し電圧より低いところから高いところまで変化させて負イオン電流を測定したものである。この図において引き出し電圧 V_{ext} が 1 kV の場合を除いて、カップ電圧が引き出し電圧よりも絶対値で低い場合、つまり引出し電極とカップ間での電界が負イオンを減速させる電界となっている場合にはカップ電流が負極性となっている。同図に示したヘリウムの場合にはこのような特性とはなっていない。これは、まさに ECR プラズマ中に負イオンが存在する一つの証拠となる現象である。つまり、カップ電位を低くしていった場合に流れる負極性の電流は、カップに入射する負イオン及び負イオンがプローブ内で中性化されてできた中性原子による二次電子電流の和であり、ヘリウムの場合には無い粒子つまり負イオンが入射していることを裏付ける特性である。

4. 考 察

負イオンの測定に際して最も注意しなければならないことは、負イオンを電子から分離して測定することである。本プローブはこれまで原研で開発してきた負イオン源加速電極の概念の基に設計製作したものである。これらの電極においては、プラズマから負イオンと電子を一緒に引き出し、引き出し電極内部に挿入された磁石によって作られる磁場で電子のみを偏向し引き出し電極自身に当て、それ以降の加速部に流出するのを防いでいる。負イオンプローブにおいても同様に引き出し電極に磁石を挿入して電子を偏向させ下流への流出を防ぐ構造とした。さらに引き出し電極にはフィンを取り付け、カップ側に出ようとする電子をこの空間で捕獲し電子の流出を防いでいる。この効果はヘリウムプラズマでの実験に於いて確認され、カップに流入する電子は引き出し電圧が 5 kV 以下程度では微小であり、負イオンと電子を分離して測定できることを確認した。

また負イオンを測定する際に問題となる負イオンプローブ内での負イオンのストリッピングと負イオンによる水素分子の電離について考察する。負イオンのストリッピングでは負イオン一個に対して電子と中性原子が各一個生成されるだけであるので、カップに負イオンの状態で捕獲されようが電子で捕獲されようが等価的に負イオン電流を測定できる。しかし、負イオンがカップに到達するまでにプローブ内部でガス分子を電離する場合は正イオンと電子が生成されるので、カップには負イオンの他にこの反応で生成された電子が余分に捕獲されることになる。それらの電子電流は負イオン測定の誤差となるものであり、その量を評価することが必要である。以下に示すようにして電離による電子電流を概算する。電離はプラズマ電極からカップまでで行なわれるが、引き出しギャップにおいて生じた電子は引き出し電極内部の磁石による電子偏向磁場によって引き出し電極に入射すると考えられるので、ここでは引き出し電極のフィン部以降での電離について考える。プローブ内部の真空度はイオン源部の真空度とほぼ同等とする。ECR イオン源での典型的な動作ガス圧力はピラニ真空計の読み値で 20 m Torr であるので、校正値を 0.6 として絶対圧力は 12 m Torr となる。従って、ガスの線密度は、引出し電極フィンからカップの底までの距離が 0.8 cm であるので

電圧を引き出し電圧より低いところから高いところまで変化させて負イオン電流を測定したものである。この図において引き出し電圧 V_{ext} が 1 kV の場合を除いて、カップ電圧が引き出し電圧よりも絶対値で低い場合、つまり引出し電極とカップ間での電界が負イオンを減速させる電界となっている場合にはカップ電流が負極性となっている。同図に示したヘリウムの場合にはこのような特性とはなっていない。これは、まさに ECR プラズマ中に負イオンが存在する一つの証拠となる現象である。つまり、カップ電位を低くしていった場合に流れる負極性の電流は、カップに入射する負イオン及び負イオンがプローブ内で中性化されてできた中性原子による二次電子電流の和であり、ヘリウムの場合には無い粒子つまり負イオンが入射していることを裏付ける特性である。

4. 考 察

負イオンの測定に際して最も注意しなければならないことは、負イオンを電子から分離して測定することである。本プローブはこれまで原研で開発してきた負イオン源加速電極の概念の基に設計製作したものである。これらの電極においては、プラズマから負イオンと電子を一緒に引き出し、引き出し電極内部に挿入された磁石によって作られる磁場で電子のみを偏向し引き出し電極自身に当て、それ以降の加速部に流出するのを防いでいる。負イオンプローブにおいても同様に引き出し電極に磁石を挿入して電子を偏向させ下流への流出を防ぐ構造とした。さらに引き出し電極にはフィンを取り付け、カップ側に出ようとする電子をこの空間で捕獲し電子の流出を防いでいる。この効果はヘリウムプラズマでの実験に於いて確認され、カップに流入する電子は引き出し電圧が 5 kV 以下程度では微小であり、負イオンと電子を分離して測定できることを確認した。

また負イオンを測定する際に問題となる負イオンプローブ内での負イオンのストリッピングと負イオンによる水素分子の電離について考察する。負イオンのストリッピングでは負イオン一個に対して電子と中性原子が各一個生成されるだけであるので、カップに負イオンの状態で捕獲されようが電子で捕獲されようが等価的に負イオン電流を測定できる。しかし、負イオンがカップに到達するまでにプローブ内部でガス分子を電離する場合は正イオンと電子が生成されるので、カップには負イオンの他にこの反応で生成された電子が余分に捕獲されることになる。それらの電子電流は負イオン測定の誤差となるものであり、その量を評価することが必要である。以下に示すようにして電離による電子電流を概算する。電離はプラズマ電極からカップまでで行なわれるが、引き出しギャップにおいて生じた電子は引き出し電極内部の磁石による電子偏向磁場によって引き出し電極に入射すると考えられるので、ここでは引き出し電極のフィン部以降での電離について考える。プローブ内部の真空度はイオン源部の真空度とほぼ同等とする。ECR イオン源での典型的な動作ガス圧力はピラニ真空計の読み値で 20 m Torr であるので、校正値を 0.6 として絶対圧力は 12 m Torr となる。従って、ガスの線密度は、引出し電極フィンからカップの底までの距離が 0.8 cm であるので

$$3.54 \times 10^{16} \times 0.012 \times 0.8 = 3.4 \times 10^{14} \text{ molec./cm}^2$$

となる。エネルギー 5 keV におけるイオン化の衝突断面積⁹⁾は $7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ であるので一つの負イオンが水素分子を電離してつくる電子の量は以下のようになる。

$$1 - \text{EXP}(-7 \times 10^{-17} \times 3.4 \times 10^{14}) = 0.024$$

つまり、負イオン電流の約 2.4% が電離で生成された電子であることがわかる。従って、測定上プローブ内部での電離の影響は殆ど無視できるものである。

5. お わ り に

負イオンを簡便に測定できる負イオンプローブを開発した。本プローブを用い超小型負イオン源および ECR プラズマ源において負イオンを測定した。超小型負イオン源においてはプローブによる測定とビーム引き出しにより得た電流値は良い一致を示し、本プローブの有効性が確認できた。ECR イオン源においては負イオン電流のチェンバー径方向分布、磁場強度依存性を測定した。その結果、チェンバー中心部より 5 cm から 10 cm の測定範囲では負イオン電流は中心からの位置に関してほぼ直線的に減少していることが明らかになった。磁場強度に関してはコイル電流が約 75 A のところに最適値があることが判明した。

以上示したように J A E R I プローブは、簡便に、各種イオン源における負イオン電流の比較や負イオンの空間分布の測定を行えるものであり、今後の負イオン源開発に貢献できるものと期待する。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた関昌弘室長ならびに小原祥裕副主任研究員をはじめとする加熱工学第 1 研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

$$3.54 \times 10^{16} \times 0.012 \times 0.8 = 3.4 \times 10^{14} \text{ molec./cm}^2$$

となる。エネルギー 5 keV におけるイオン化の衝突断面積⁹⁾は $7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ であるので一個の負イオンが水素分子を電離してつくる電子の量は以下のようになる。

$$1 - \text{EXP}(-7 \times 10^{-17} \times 3.4 \times 10^{14}) = 0.024$$

つまり、負イオン電流の約 2.4% が電離で生成された電子であることがわかる。従って、測定上プローブ内部での電離の影響は殆ど無視できるものである。

5. お わ り に

負イオンを簡便に測定できる負イオンプローブを開発した。本プローブを用い超小型負イオン源および ECR プラズマ源において負イオンを測定した。超小型負イオン源においてはプローブによる測定とビーム引き出しにより得た電流値は良い一致を示し、本プローブの有効性が確認できた。ECR イオン源においては負イオン電流のチェンバー径方向分布、磁場強度依存性を測定した。その結果、チェンバー中心部より 5 cm から 10 cm の測定範囲では負イオン電流は中心からの位置に関してほぼ直線的に減少していることが明らかになった。磁場強度に関してはコイル電流が約 75 A のところに最適値があることが判明した。

以上示したように J A E R I プローブは、簡便に、各種イオン源における負イオン電流の比較や負イオンの空間分布の測定を行えるものであり、今後の負イオン源開発に貢献できるものと期待する。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた関昌弘室長ならびに小原祥裕副主任研究員をはじめとする加熱工学第 1 研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

$$3.54 \times 10^{16} \times 0.012 \times 0.8 = 3.4 \times 10^{14} \text{ molec./cm}^2$$

となる。エネルギー 5 keV におけるイオン化の衝突断面積⁹⁾は $7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ であるので一個の負イオンが水素分子を電離してつくる電子の量は以下ようになる。

$$1 - \text{EXP}(-7 \times 10^{-17} \times 3.4 \times 10^{14}) = 0.024$$

つまり、負イオン電流の約 2.4% が電離で生成された電子であることがわかる。従って、測定上プローブ内部での電離の影響は殆ど無視できるものである。

5. お わ り に

負イオンを簡便に測定できる負イオンプローブを開発した。本プローブを用い超小型負イオン源および ECR プラズマ源において負イオンを測定した。超小型負イオン源においてはプローブによる測定とビーム引き出しにより得た電流値は良い一致を示し、本プローブの有効性が確認できた。ECR イオン源においては負イオン電流のチェンバー径方向分布、磁場強度依存性を測定した。その結果、チェンバー中心部より 5 cm から 10 cm の測定範囲では負イオン電流は中心からの位置に関してほぼ直線的に減少していることが明らかになった。磁場強度に関してはコイル電流が約 75 A のところに最適値があることが判明した。

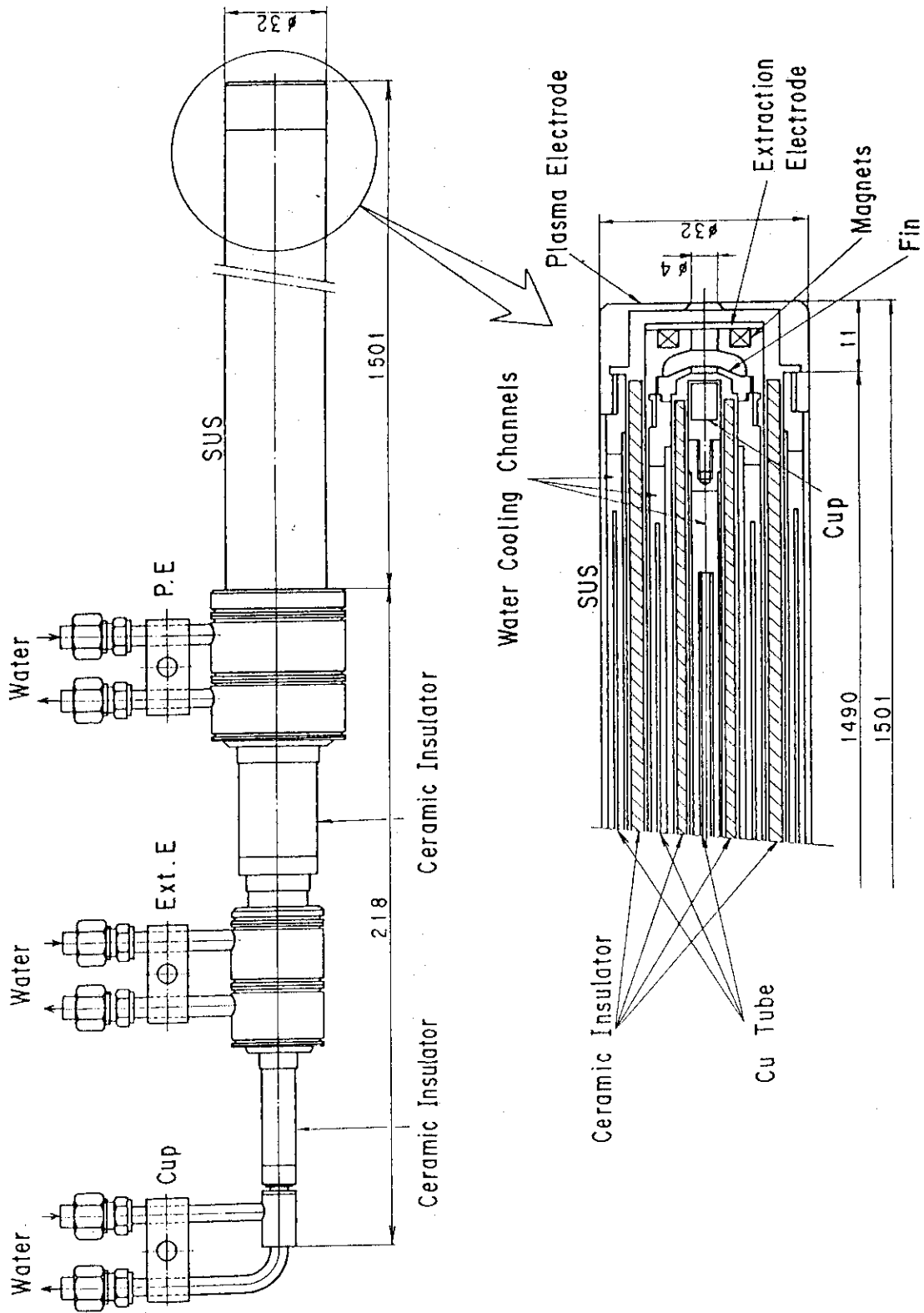
以上示したように J A E R I プローブは、簡便に、各種イオン源における負イオン電流の比較や負イオンの空間分布の測定を行えるものであり、今後の負イオン源開発に貢献できるものと期待する。

謝 辞

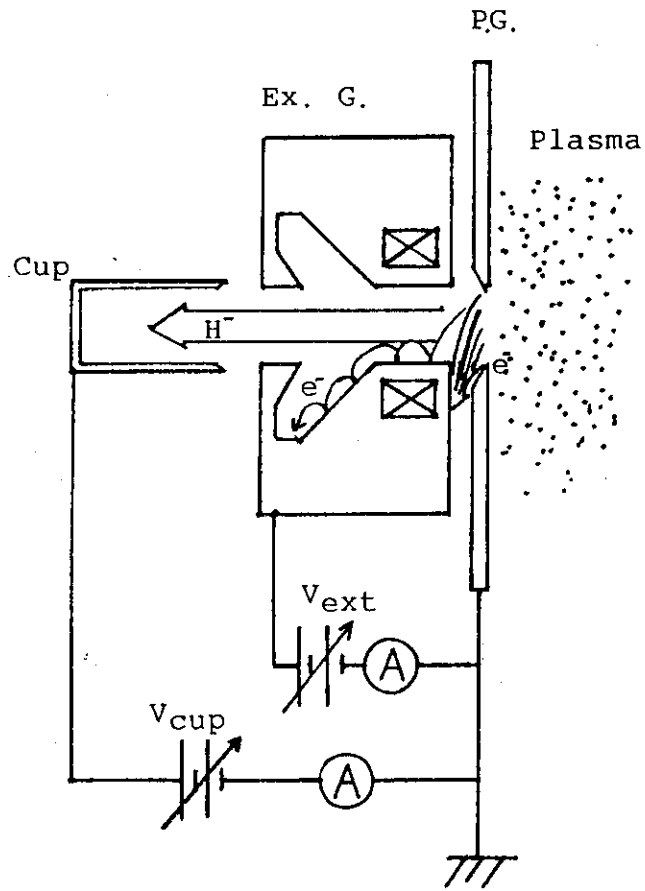
本研究を遂行するにあたり有意義な討論をして頂いた関昌弘室長ならびに小原祥裕副主任研究員をはじめとする加熱工学第 1 研究室の諸氏に感謝の意を表します。また終始激励して頂いた島本進核融合研究部長、飯島勉那珂研究所長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Y. Ohara ; Proc. on 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, Mito, Jan. (1990) pp. 120-125.
- 2) K. N. Leung, K. W. Ehlers, and R. V. Pyle ; Rev. Sci. Instrum. 56(3), March (1985) pp. 364-368.
- 3) A. J. T. Holmes ; Proc. of the Int. Conf. on Ion Sources, Berkeley. June (1989) pp. 389-391.
- 4) Y. Okumura, H. Hanada, T. Inoue, H. Kojima, Y. Matsuda, Y. Ohara, H. Oohara, M. Seki, Y. Suzuki, and K. Watanabe ; 16th Symp. on Fusion Tech., London, Sep (1990).
- 5) K. Watanabe, M. Hanada, T. Inoue, H. Kojima, Y. Matsuda, Y. Ohara, and Y. Okumura ; Proc. on 13th Symp. on Ion Source and Ion-Assisted Tech. Tokyo, June (1990) pp. 153-156.
- 6) K. Ota, N. Inoue, and T. Uchida ; Kakuyugokenkyu, 52(1984).
- 7) Y. Matsuda, M. Hanada, T. Inoue, H. Kojima, Y. Ohara, Y. Okumura, and K. Watanabe ; Proc. on 12th Symp. on Ion Source and Ion-Assisted Tech. Tokyo, (1989) pp. 107-110.
- 8) T. Inoue, G. D. Ackerman, W. S. Cooper, M. Hanada, J. W. Kwan, Y. Ohara, Y. Okumura, and M. Seki ; Rev. Sci. Instrum. 61(1), January (1990) pp. 496-498.
- 9) Oak Ridge National Laboratory ; 'Atomic Data for Controlled Fusion Research' ORNL-5206.



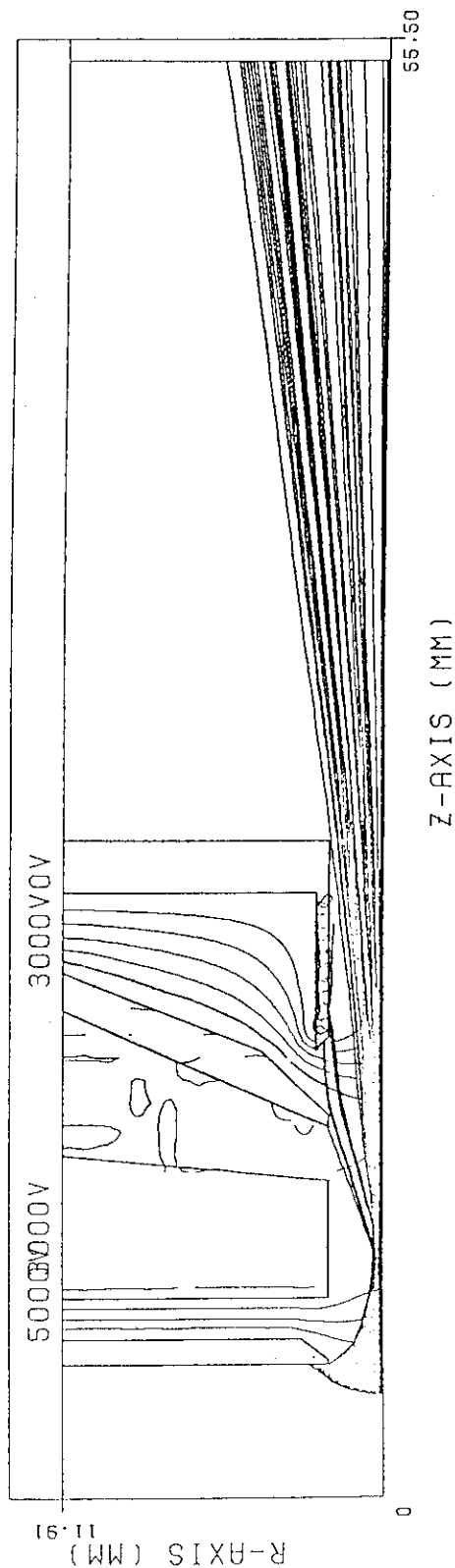
第1図 負イオンプローブの構造



第2図 プローブを用いた測定回路

***PROBE FOR NEGATIVE ION 10.MA/CM2 H- (PROBE1)

CURRENT DENSITY = 1.0000E+01 (MA/CM2)
 TOTAL CURRENT = 1.2951E-03 (A)
 PERVEANCE = 3.6632E-09 (A/V**1.5)
 MINIMUM POTENTIAL = 0.0 (V) AT Z = 5.5499E-02 (M)
 DIVERGENCE (RMS) = 5.3138E+00 (DEG)
 ELECTRON TEMPERATURE = 0.0 (EV)
 ION TEMPERATURE = 0.0 (EV)

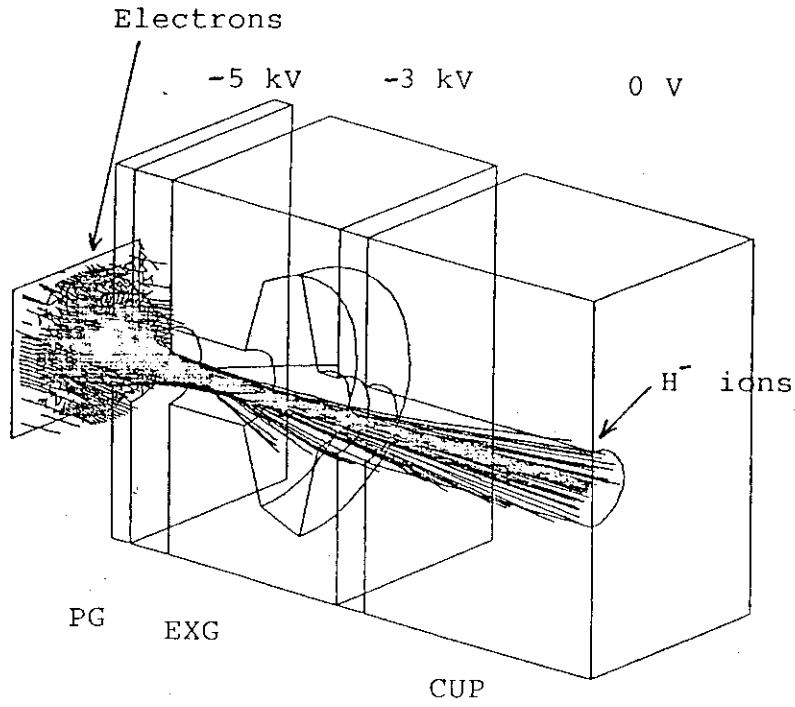


第3(1)図 プローブ内部における負イオンの2次元軌道計算例

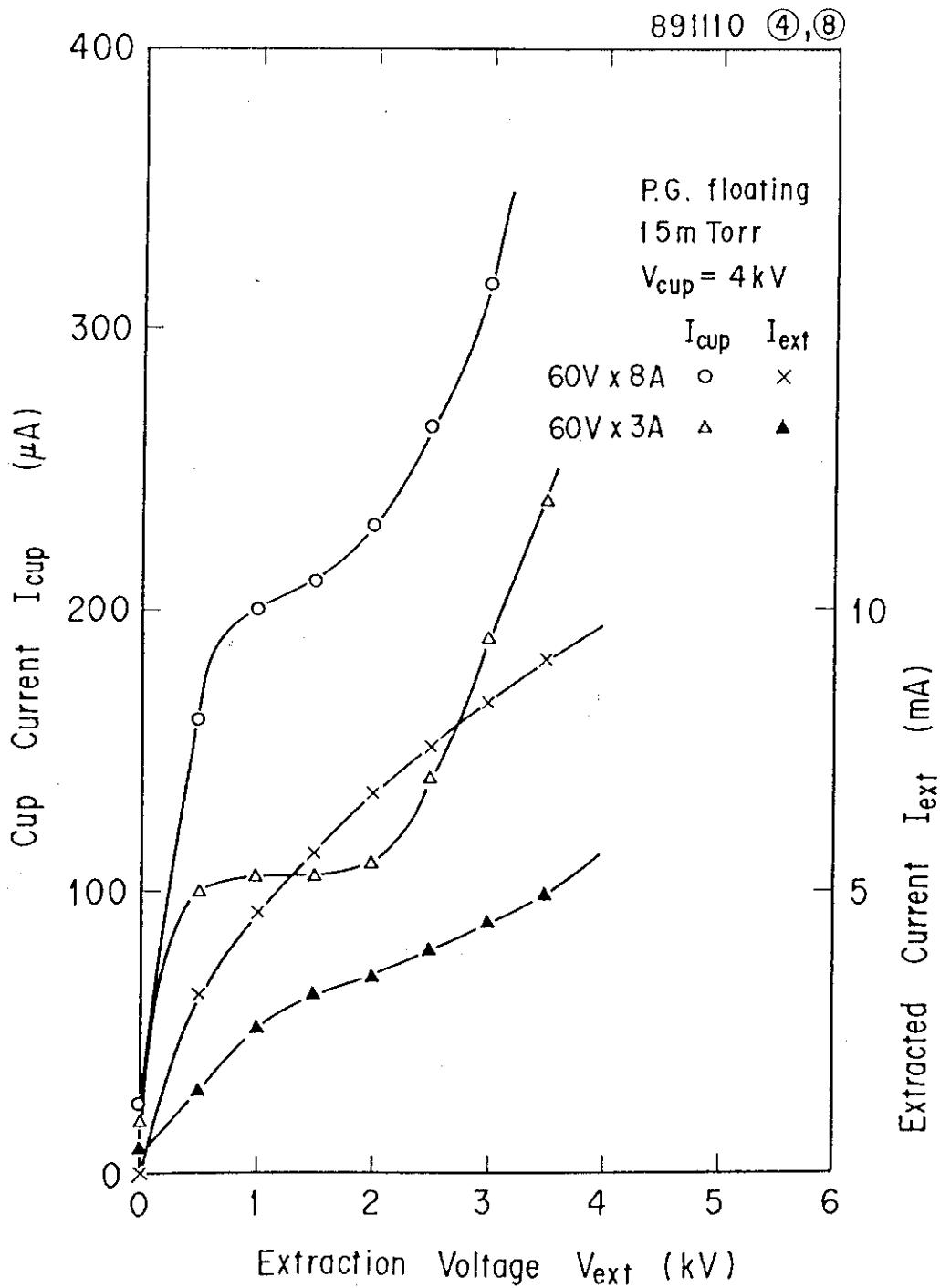
$$J_e = 50 \text{ mA/cm}^2$$

$$J_{H^-} = 5 \text{ mA/cm}^2$$

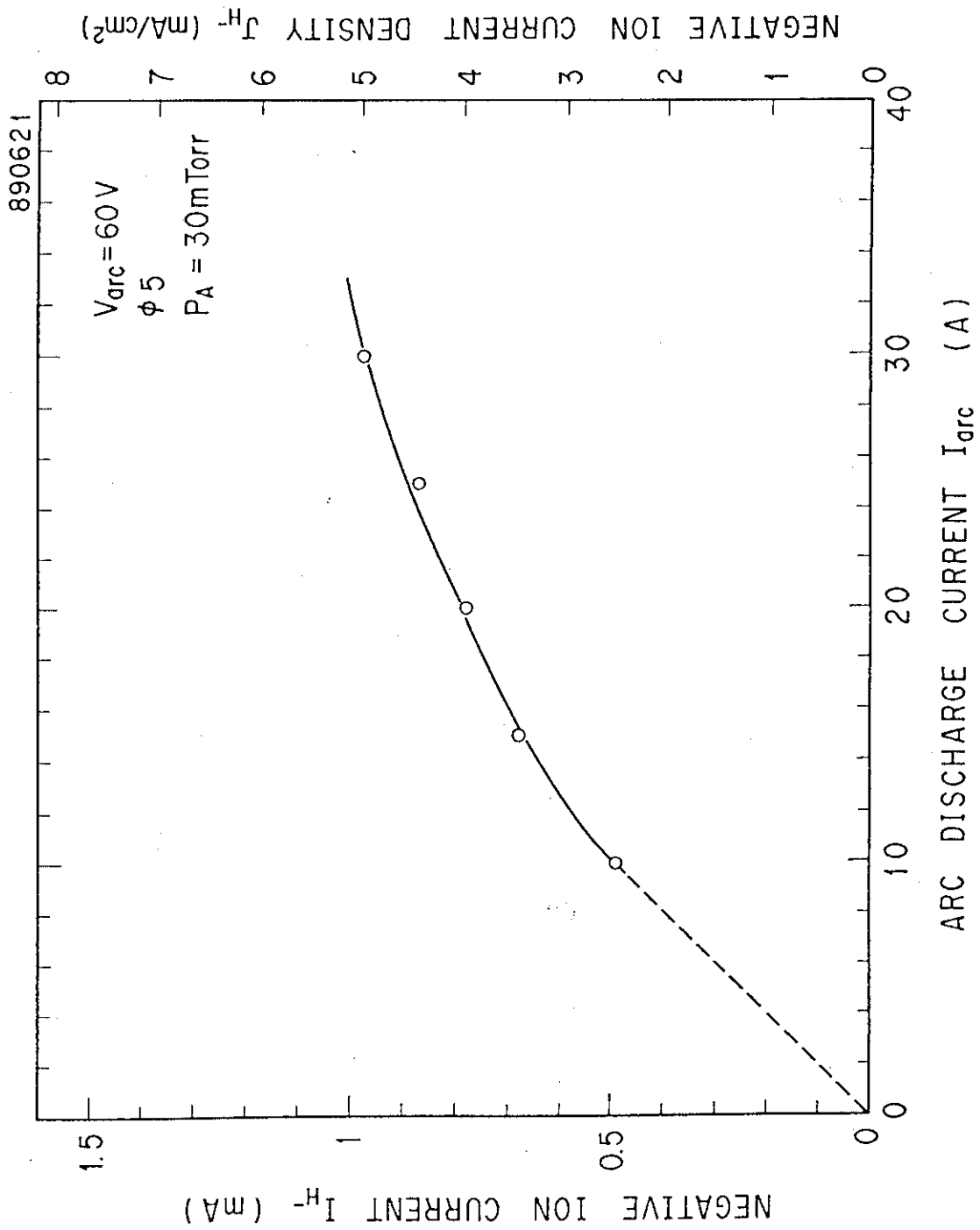
$$B = 1.2 \text{ T}$$



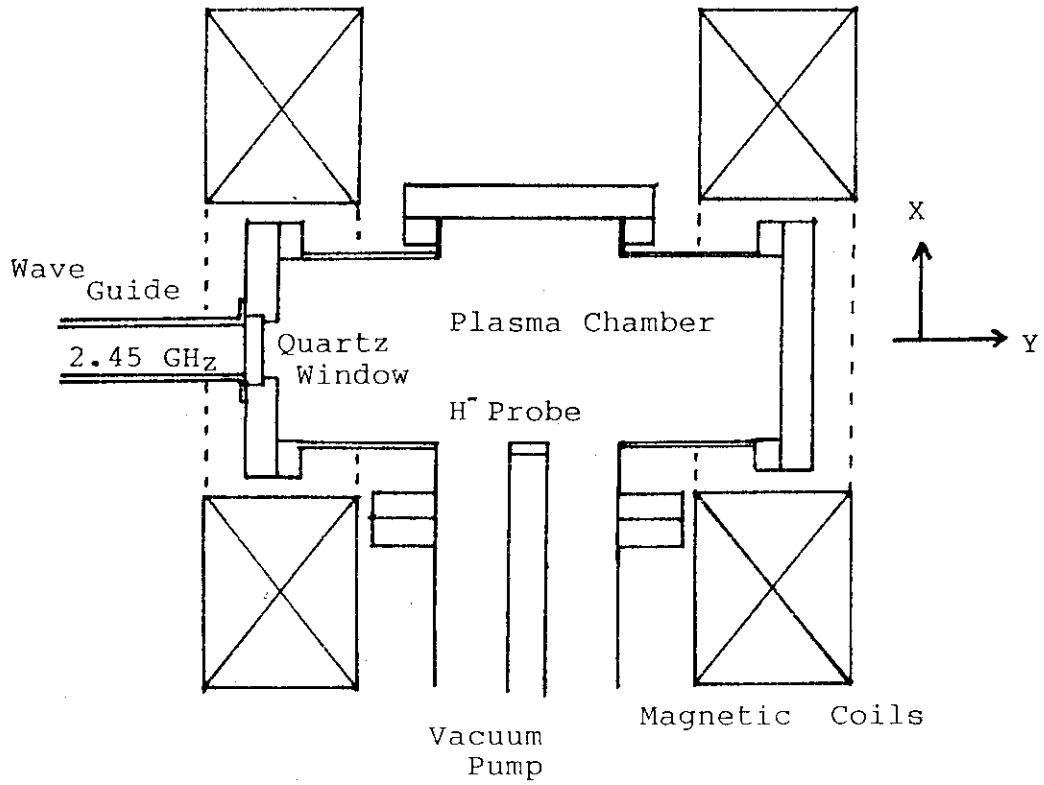
第 3(2)図 プローブ内部における電子及び負イオンの 3次元軌道計算例



第4図 超小型負イオン源における負イオンプローブでの測定結果

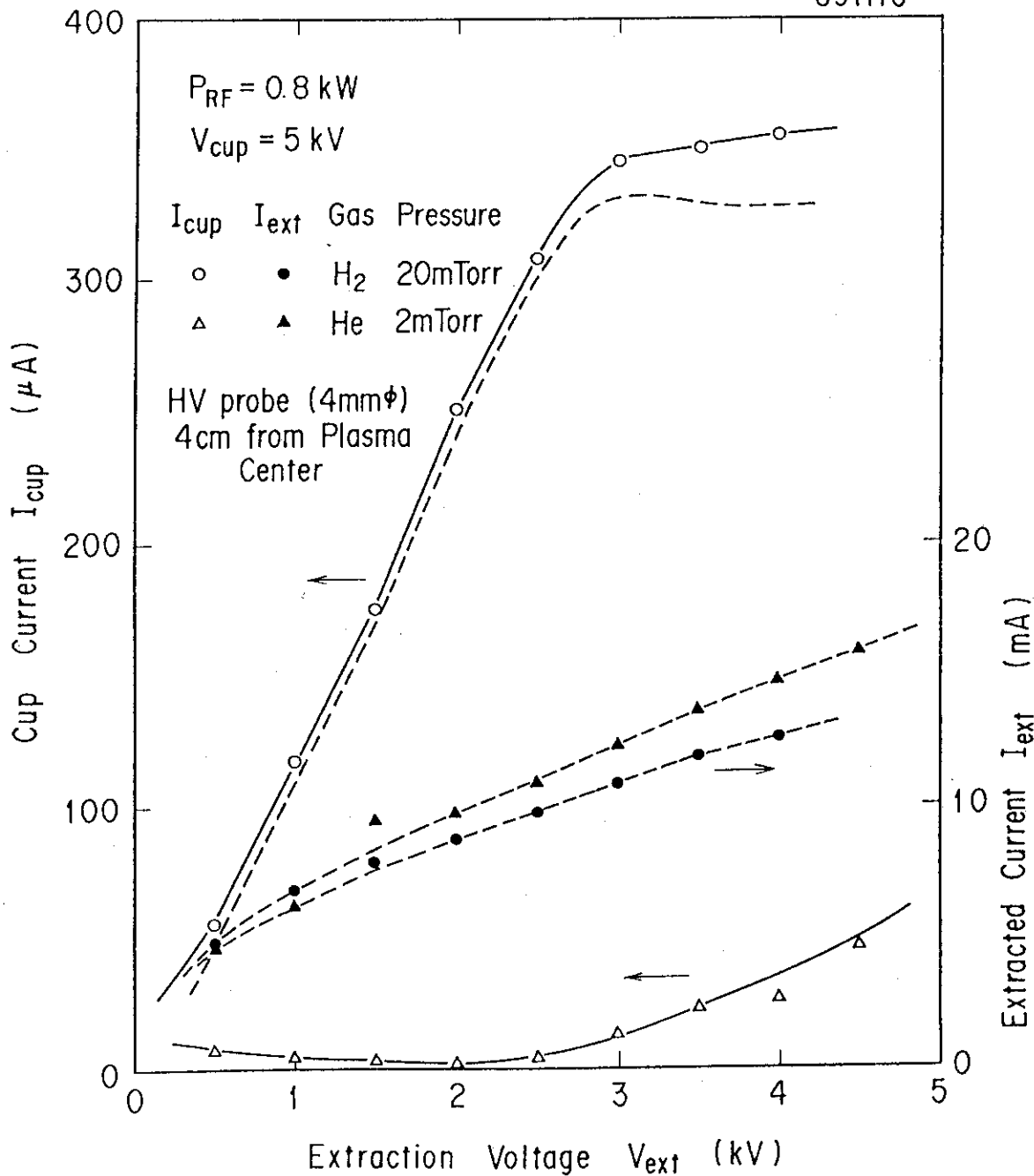


第5図 超小型負イオン源における負イオンビーム電流のアーク放電電流依存性

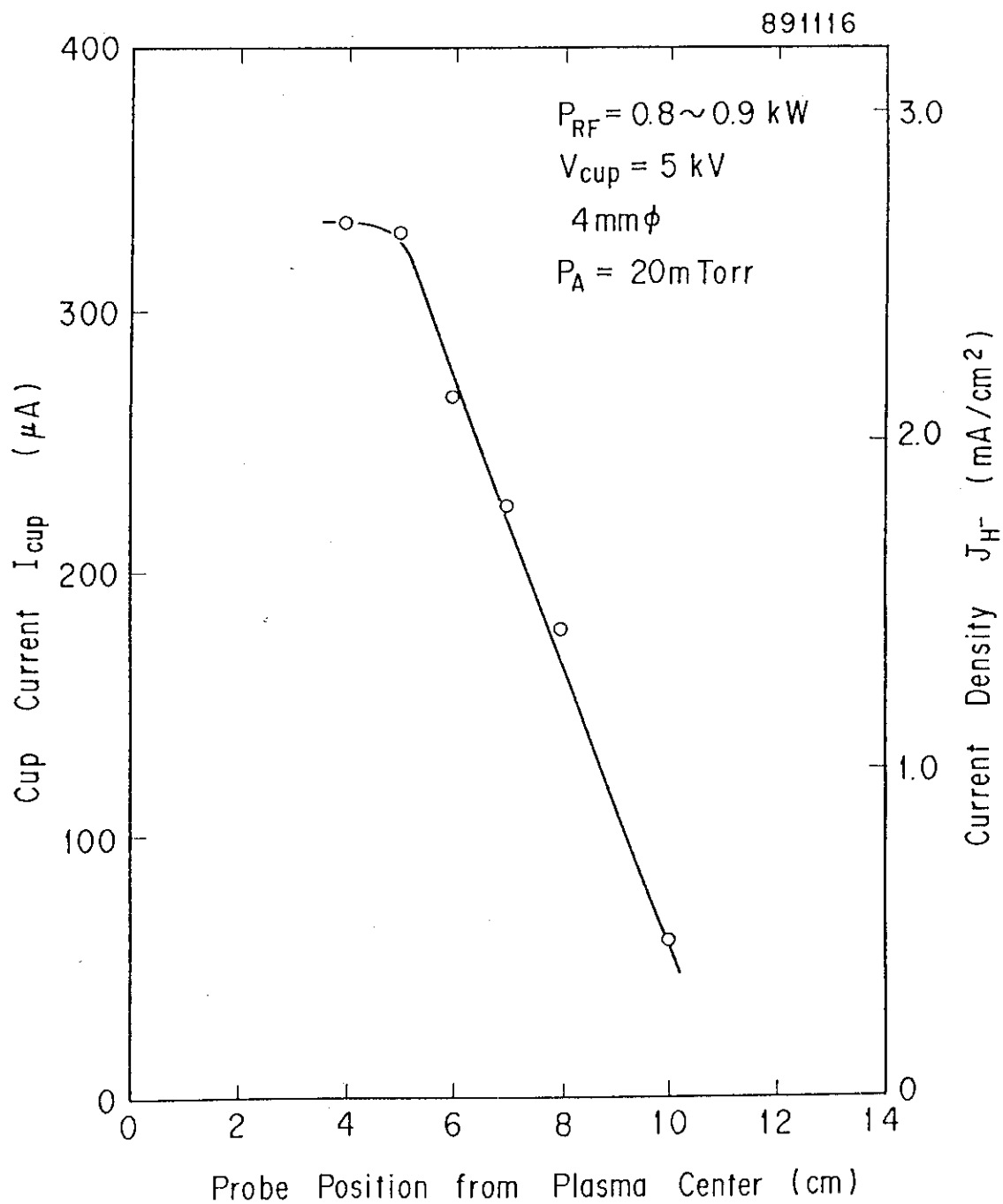


第6図 ECRプラズマ源に負イオンプローブを挿入した図

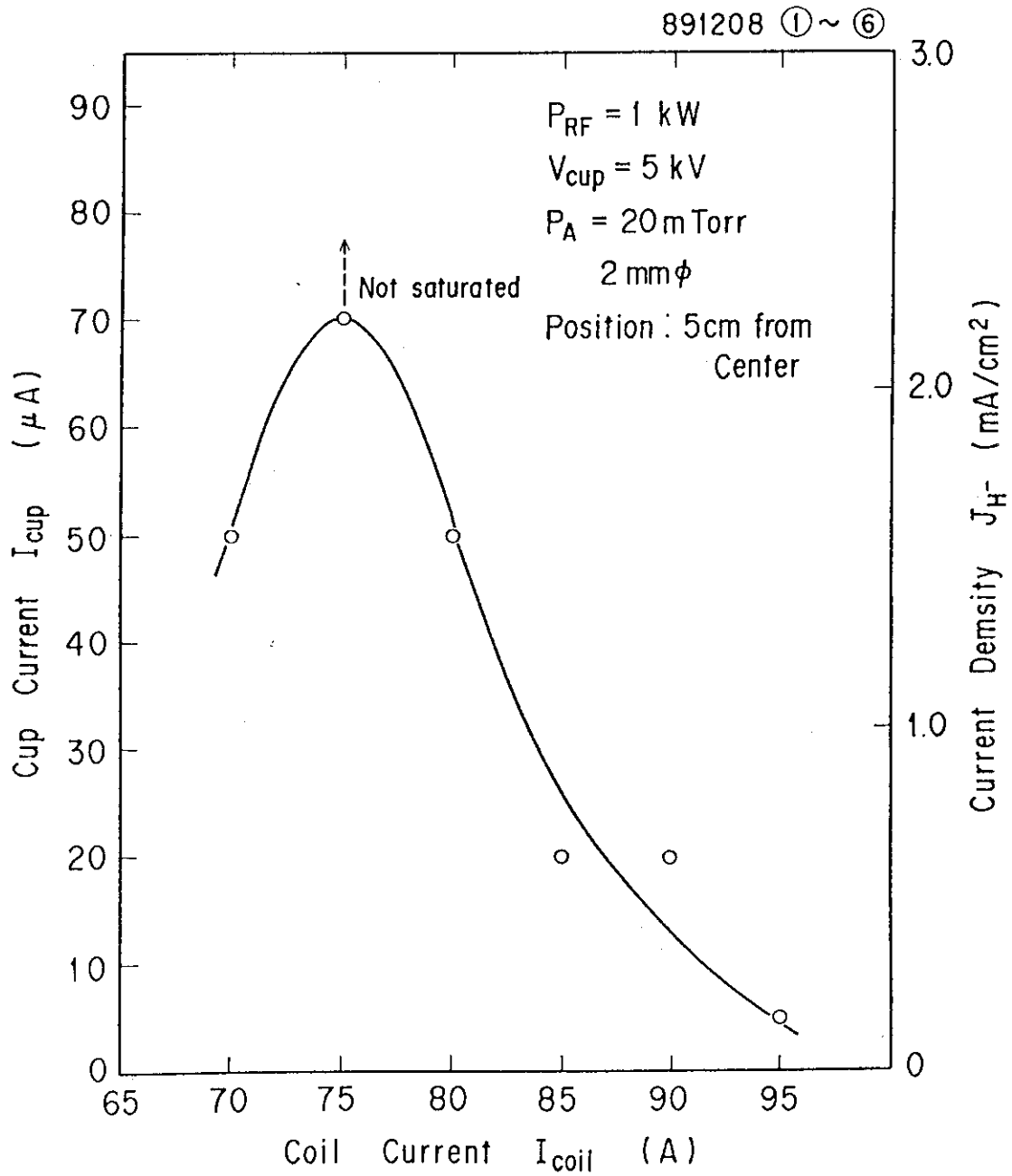
891116



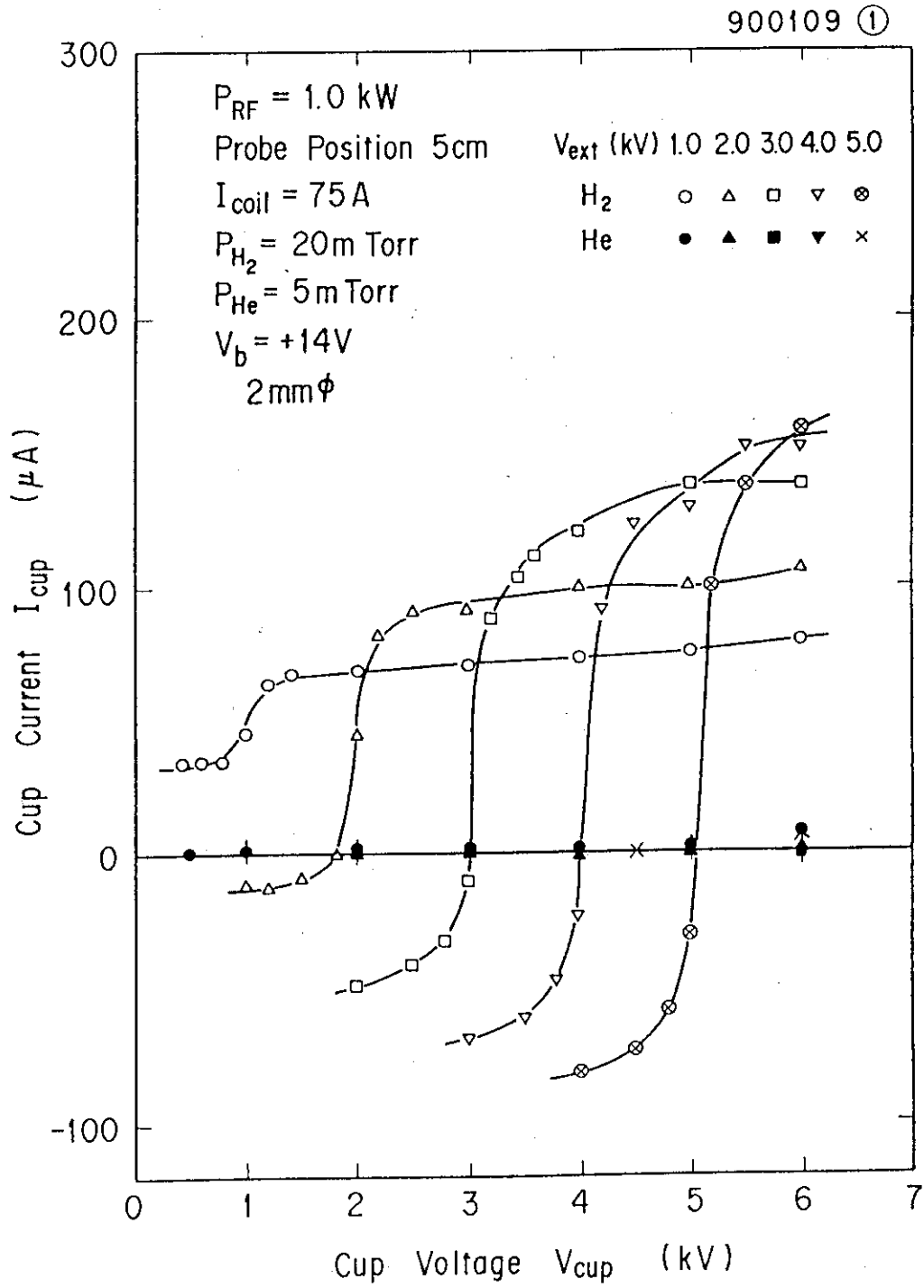
第7図 ECRプラズマ源における負イオン捕集カップ電流の引き出し電圧依存性



第8図 ECRプラズマ源における負イオン電流のチェンバー径方向分布



第9図 ECRプラズマ源での負イオン電流の磁場発生コイル電流値依存性



第10図 ECRプラズマ源における負イオンプローブの負イオン捕集カップ電流の変化