

JAERI-Tech  
2003-006



JP0350071



セシウム添加型負イオン源におけるプラズマ電極材質の  
違いが負イオン生成に与える影響

2003年 3月

清水 崇司・森下 卓俊・柏木 美恵子・花田 磨砂也  
伊賀 尚・井上 多加志・渡辺 和弘・和田 元\*・今井 剛

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

**This report is issued irregularly.**

**Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.**

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

## セシウム添加型負イオン源におけるプラズマ電極材質の違いが 負イオン生成に与える影響

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

清水 崇司\*・森下 卓俊・柏木 美恵子・花田 磨砂也  
伊賀 尚・井上 多加志・渡辺 和弘・和田 元\*・今井 剛

(2003年1月22日受理)

セシウム添加型負イオン源におけるプラズマ電極の材質の違いが、負イオン生成効率に与える影響について実験的に調べた。本研究においてはプラズマ電極として金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、ニッケル(Ni)、モリブデン(Mo)の5電極を用いた。電極表面がフィラメント材質であるタングステンで覆われることを避けるために2.45GHzのマイクロ波プラズマ源を用い、各電極において仕事関数と負イオン電流量の相関性を測定した。また、電極表面上に堆積したタングステンが負イオン電流・仕事関数へどのような影響を与えるかも併せて検証した。

その結果、得られる負イオン電流はそのときの電極表面の仕事関数によって一意的に決まり、電極材質そのものには無関係であることを明らかにした。即ち材質の違いが仕事関数の違いをもたらし、仕事関数の違いによって負イオン生成量が変わることが分かった。実験で試験した材質の中では、Au電極を用いた場合が仕事関数も低く1.42eVを示し、負イオン生成効率も高い値(20.7 mA/kW)を示した。この値は、従来から電極材質として用いられているCuやMo電極を30%程度上回る値であった。さらに、セシウムとタングステンを同時堆積させた電極では、負イオン電流でAu電極をも上回る結果の24.6 mA/kWを得た。この場合、タングステン電極にセシウムを付けた場合の1.7倍の効率増加が得られた。

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

※ 特別研究生 (同志社大学)

\* 同志社大学

Effect of Electrode Materials on a Negative Ion Production  
in a Cesium Seeded Negative Ion Source

Takashi SHIMIZU\*, Takutoshi MORISHITA, Mieko KASHIWAGI,  
Masaya HANADA, Takashi IGA, Takashi INOUE,  
Kazuhiro WATANABE, Motoi WADA\* and Tsuyoshi IMAI

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

(Received January 22, 2003)

Effects of plasma grid materials on the negative ion production efficiency in a cesium seeded ion source have been experimentally studied. Grid materials of Au, Ag, Cu, Ni, and Mo were examined. A 2.45GHz microwave ion source was utilized in the experiment to avoid contamination of tungsten from filament cathode. Relations between the negative ion currents and work functions of the grid were measured for these materials. Influence of the contamination by tungsten on the grid was also investigated. It was clarified that the negative ion production efficiency was determined only by the work function of the grid. The efficiency did not depend on the material itself. The lowest work function of 1.42 eV was obtained for Au grid with Cs, and a high H<sup>-</sup> production efficiency of 20.7 mA/kW was measured. This efficiency is about 1.3 times larger than that of Cs/Mo and Cs/Cu. Further improvement of the production efficiency was observed by covering the plasma grid with tungsten and cesium simultaneously. Such co-deposition of W and Cs on the plasma grid produced the negative ion production efficiency of 1.7 times higher than that from the tungsten grid simply covered with Cs.

Keywords: Negative Ion, Surface Production, Work Function, Cesium, ECR, Plasma Grid,  
Grid Material, Ion Source

---

※ Fellow of advanced science (Doshisha University)

\* Doshisha University

## 目次

1.	はじめに.....	1
2.	プラズマ電極材質の選定.....	1
3.	実験装置.....	2
3.1	プラズマ生成部.....	2
3.2	ビーム引き出し部.....	3
3.3	プラズマ電極.....	3
4.	実験結果と考察.....	4
4.1	プラズマ特性.....	4
4.1.1	ガス圧特性.....	4
4.1.2	プラズマ分布.....	4
4.2	ビーム引き出し特性.....	4
4.3	電極材質の違いが負イオン電流へ与える影響.....	5
4.3.1	光電子電流量と仕事関数の相関性.....	5
4.3.2	PG 温度依存性.....	5
4.3.3	仕事関数との相関性.....	6
4.4	PG 表面への W 堆積が負イオン生成効率へ与える影響.....	6
4.4.1	Cs 添加前にタングステンを堆積させ、予め W 層を形成した場合.....	7
4.4.2	Cs と W を同時堆積させる場合.....	7
5.	まとめ.....	8
	謝辞.....	9
	参考文献.....	9

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Selection of The Materials of Plasma Grid Material.....	1
3. Experimental Setup.....	2
3.1 Plasma Generator.....	2
3.2 Beam Extraction.....	3
3.3 Plasma Grid.....	3
4. Experimental Results and Discussion.....	4
4.1 Plasma Characteristics.....	4
4.1.1 Gas Pressure Dependency.....	4
4.1.2 Plasma Distribution.....	4
4.2 The Characteristics of Beam Extraction.....	4
4.3 Influence of Electrode Materials on The Negative Ion Beam.....	5
4.3.1 The Correlation Between The Photoelectron Currents and Work Function of The Plasma Grid.....	5
4.3.2 The Dependence on Plasma Grid Temperature.....	5
4.3.3 The Correlation Between The Negative Ions Beam and Work Function of The Plasma Grid.....	6
4.4 Effect of Plasma Grid Covered with Tungsten.....	6
4.4.1 A Case when W Deposited Before Cesium-seeding.....	7
4.4.2 A Case when Cs and W Co-deposited.....	7
5. Conclusions.....	8
Acknowledgement.....	9
References.....	9

## 1. はじめに

核融合分野の他、高エネルギー加速器分野、材料プロセス分野など、近年の先端科学技術や産業分野において、負イオンビームの役割は極めて重要なものとなっている。特に、核融合分野での進展がめざましい大出力負イオン源では、体積生成型負イオン源にセシウム(Cs)添加を行うと、負イオンビーム量が3-5倍に増加することが知られており、本方式の負イオン源が実用化されている<sup>[1][2]</sup>。

これまでの研究で、負イオン電流が負イオン引き出しの第一番目の電極(プラズマ電極: PG)の仕事関数の低下に伴って指数関数的に増大することなどが明らかになっており、負イオンの主な生成機構はプラズマ電極(PG)面での表面生成によるものと考えられている<sup>[3]</sup>。さらに、プラズマポテンシャルの相関からも表面生成を支持する実験結果も報告されている<sup>[4]</sup>。

表面生成の効率をさらに改善できれば、さらなる高電流密度、大電流の負イオン源が可能となる。すなわち、セシウム添加型の負イオン源における効率改善のためには、より低い仕事関数を与える電極の条件を得ることが極めて有効と考える。

Cs吸着時の金属の仕事関数は金属の材料によって異なることがわかっている。また、負イオン源内と同様な条件を与えて行われた実験、即ち、異なる金属材料の表面にCsを蒸着して、プラズマによって攪拌、温度制御等を行い、Ar<sup>+</sup>レーザを金属材料表面に照射して光電子電流を測定した実験からも、金属材料により光電子電流が大きく変化することが示されている。このことから仕事関数も異なり高い負イオン生成効率を期待できる材料の組み合わせがあることが示されている<sup>[5]</sup>。しかしながら、これまで、セシウム添加型負イオン源でPG材質を種々変えて負イオン生成効率について調べた研究は無い。

本研究は、上記のような負イオンの表面生成機構に基づき、より高効率な負イオン生成を得るためにセシウム添加型負イオン源におけるPG電極材質の違いと負イオン電流の違いについて実験的に調べた。結果を報告する。

## 2. プラズマ電極材質の選定

プラズマ電極(PG)として用いる材料は、原研・加熱工学研究室で行われた実験結果<sup>[5]</sup>をもとに選定した。Fig. 2.1に文献[5]の実験結果を示す。実験では、8つの異なる金属で製作したテスト電極にCsを蒸着し、488 nmのAr<sup>+</sup>レーザを照射した際の光電子電流を測定している。横軸はテスト電極の温度であり、温度調整により電極表面のCs吸着層の厚さを変化させている。

仕事関数 $\phi$ の金属表面に仕事関数以上のエネルギー $h\nu$ を持った光を照射すると、金属表面から光電子が放出される。放出される光電子電流 $Y$ は

$$Y \propto \frac{(h\nu - \phi_w)^2}{(U_0 - h\nu)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{for } \phi_w < h\nu \quad (2.1)$$

(※ $U_0$ : 表面ポテンシャル障壁、 $\nu$ : 振動数、 $h$ : プランク定数)

に比例する(Fowler の式)<sup>[6]</sup>。これによると、光電子電流が大きい場合には仕事関数が小さいと考えられる。これまでの負イオン源の研究から、電極の仕事関数を下げることによって負イオン電流が増大することが分かっている。本研究においては、光電子電流が大きく、仕事関数が低いと予想される Au, Ag, Ni を電極材質として選定した。これらとの比較のために、従来の電極材質である Mo, Cu を用いた電極も用意した。

### 3. 実験装置

本研究では、プラズマ生成は 2.45GHz のマイクロ波を使用した電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電によって行った。マイクロ波を用いたことにより、従来のフィラメントを使用するアーク放電の際、問題となるフィラメント材(タングステン)のPG表面への蒸着を防ぐことができ、電極材料による違いをより明確に調べることが可能となる。各装置の説明を各々以下に述べる。

#### 3.1 プラズマ生成部

Fig. 3.1 にイオン源の断面図を示す。放電チャンバは無酸素銅製で水冷式となっており、直径 340 mm の半円筒のカマボコ型イオン源である<sup>[7]</sup>。Fig. 3.2 に磁石の極性と磁場配位の計算結果をマイクロ波入射方向に対して(a)垂直方向、(b)水平方向をそれぞれ示す。イオン源周りのプラズマ閉じこめ用の永久磁石は放電チャンバ内で広い ECR 共鳴面(875 G)を確保するために、通常のアーク放電で用いるものより 2 倍の大きさ(幅 10mm, 高さ 40mm)のネオジウム磁石を用いた。また、チャンバ中心にできるだけ広いフィールドフリー領域(<20G)を形成させるために、12 極のカスプ磁場配位とした。Fig. 3.3 にビームライン(ビーム軸に平行な)方向の磁場配位を示す。横軸は PG からの距離である。今回の磁石配置で得られるフィルタ磁場は約 600Gauss・cm である。

Fig. 3.4 に放電チャンバ、マイクロ波導波管接続、光電子電流測定系の回路図を示す。マイクロ波はマグネトロン電源から導波管を介して、エンドプラグの片面からプラズマへ入射される。使用したマイクロ波発振器は周波数 2.45 GHz で最大 5.0 kW の出力が可能である。チャンバ内で消費されるマイクロ波パワー ( $P_{net}$ ) は、入射したマイクロ波パワーから反射波のパワーをさし引いた値であり、導波管途中の方向性結合器によって測定した。導波管途中にセラミック窓を設け、そこでチャンバ側の真空を保持した。また、セラミック窓の保護のために、導波管を 90° 屈曲してチャンバに接続する事によって、セラミック窓をプ



ラズマから直視しない位置に設置した。チャンバからセラミック窓までの導波管は銅製であり、水冷されている。

チャンバ内のプラズマ密度分布を測定するために、Fig. 3.5 に示す位置から、ラングミュアプローブ①、②、③を矢印の方向へそれぞれ挿入した。プローブ①、②はそれぞれドライバ領域 (PG 表面から 150 mm) とフィルタ領域 (PG 表面から 30 mm) に設置した。③はチャンバ上部から PG に向かって掃引できる。H<sub>2</sub> ガスはマイクロ波入射口に対面するエンドプラグから導入した。必要に応じてアルゴン (Ar) 放電で電極をクリーニングするために、Ar ガス導入配管も取り付けした。

PG 表面の仕事関数は図に示す位置から波長の異なる Ar<sup>+</sup> レーザ 3 波長(458,488,514 nm) を PG に照射し、放出された光電子電流を PG とチャンバ間にバイアス電圧をかけることにより測定した。測定値から式(2.1)の Fowler の式によって仕事関数を算出した。算出結果の一例を Fig. 3.5 に示す。

### 3.2 ビーム引き出し部

上記の負イオン源を原研の負イオン源テストスタンド (ITS-2M) に取り付け、負イオンビームを引き出した。装置全体の鳥瞰図を Fig. 3.6 に示す。

Fig. 3.7 に示すようにビーム引き出し部として 3 枚電極からなる引き出し、加速系を用いた。それぞれの電極が取り付けある電極支持フランジの間はセラミック製の絶縁スペーサによって支持されている。さらにそれぞれのフランジは大気・真空側両面にわたって電界緩和のためのコロナシールドが設けられており、同加速系において最大 50 keV まで負イオンを加速することが可能である<sup>[8]</sup>。本実験においては、引き出し電圧を 1.7 kV、加速電圧を 10 kV とした。PG・EXG(引き出し電極)間、EXG・GG(接地電極)間のギャップはそれぞれ 6.3 mm、10.9 mm である。イオン源より引き出された負イオンビームの電流は、接地電極から下流 1.17 m の地点に設置した多チャンネルカロリメータによって熱的に測定した。

### 3.3 プラズマ電極

Fig.3.8 に今回使用したプラズマ電極の図を示す。前章で述べた理由から Au, Ag, Ni, Cu, Mo の 5 電極を製作した。このうち Au, Ni に関してはそれぞれ無酸素銅、モリブデンを母材としてメッキ(Au は 3 μm, Ni は 5 μm 厚のメッキ)した電極を用いた。このメッキの厚さは、Cs<sup>+</sup>などによるスパッタリングを受けたとしても十分長時間運転に耐えうる厚みである。電極の直径は 225 mm、厚みは 2.0 mm、128 mm×140 mm の中に直径 14 mm の孔を 49 個開けてある。四隅の穴は電極孔の軸合わせ用であり、それ以外の 45 個がビーム引き出し孔である。ビーム引き出し面積は合計約 69 cm<sup>2</sup>となる。PG 表面への Cs 吸着量の最適化は PG 温度を変化させることによって調整した。PG 温度制御はプラズマからの輻射や粒子衝突による熱、および PG 周辺の冷却用パイプに高温流体 (ガルデン: フッ素系不活性熱媒体) を流し、その温度を制御することによって調整した。ガルデンの最高温度は 170 °C である。PG

の温度測定は図に示す位置に熱電対を装着して行った。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 プラズマ特性

PG 材質についての実験をするにあたり、はじめに引き出し面に一様で高密度なプラズマの生成が可能な条件を求めた。

#### 4.1.1 ガス圧特性

マイクロ波パワーを 2.5 kW に固定した際のガス圧特性を Fig. 4.1 と 4.2 に示す。測定はプローブ①、②を用い、マイクロ波入射側エンドプラグから 100 mm、及び 210 mm の位置でそれぞれイオン飽和電流  $J_{is}$ 、電子温度  $T_e$  を測定した。ガス圧力が 0.13 Pa~0.4 Pa における測定の結果、低ガス圧になるに従って  $J_{is}$  は増加傾向を示し、その際のフィルタ磁場領域の電子温度は常に 1.7 eV 以下に抑えられており、負イオン生成に適する低い電子温度領域の条件が得られている。本実験系ではマイクロ波によるプラズマ生成が安定に行える運転ガス圧である 0.13 Pa とした。

#### 4.1.2 プラズマ分布

マイクロ波パワーを 2.5 kW、ガス圧を 0.13 Pa に固定した際のイオン源内のプラズマ分布をプローブ①、②、③を用いて測定した。結果を Fig. 4.3~4.5 に示す。

Fig. 4.3、4.4 の横軸はマイクロ波導入側エンドプラグからの距離で 340 mm はチャンバ内壁面間の距離に相当する。Fig. 4.3 はドライバ領域をスキャンしたプローブ①の結果である。マイクロ波入射ポートに近づくにつれて、電子温度  $T_e$  が急激に上昇しているのがわかる。これは導波管とエンドプラグの接続部周辺でのマイクロ波パワー吸収が大きいためと考えられるが、マイクロ波入射ポートから 100~240 mm のビーム引き出し孔がある領域ではほぼ一様なプラズマが生成されており、この領域でのイオン飽和電流は約 35 mA/cm<sup>2</sup>、電子温度は 3 eV 程度であった。Fig. 4.4 はフィルタ領域をスキャンした際のプローブ②の結果である。プロファイルは Fig. 4.3 と同様にエンドプラグ近傍で  $T_e$  が急激な立ち上がりを示しているが 100~240 mm の領域ではほぼ一様なプラズマとなっている。Fig. 4.5 はアークチャンバドーム部分から PG 方向へスキャンしたプローブ③の結果である。横軸は PG 表面からの距離で、ドライバ領域において 3~4 eV 程度であった電子温度がフィルタ磁場の効果により PG から 10 mm の距離では 1 eV 程度まで低下しており、負イオン生成に適した電子温度であることを確認した。

### 4.2 ビーム引き出し特性

マイクロ波パワーを 2.5 kW、ガス圧を 0.13 Pa に固定した上で最適な負イオンビームの引

引き出し条件を調整した。加速電圧  $V_{acc}$  を 10 kV に固定し、引き出し電圧  $V_{ext}$  を変化させることによってイオン引き出し条件の最適化を図った。結果を Fig. 4.6 に示す。横軸に  $V_{ext}$  を、縦軸に加速電源のドレイン電流  $I_{acc}$  とカロリメータにより算出した水素負イオン電流値  $I_H$  及び、引き出し電流  $I_{ext}$  をプロットした。 $I_H$  の値は 0.5 kV 以下または 2.0 kV 以上で大きくなっているが、これはガウス分布近似によってビーム量を算出しているため、収束性が悪いビームによって大きな誤差が生じた結果である。ビームプロファイルの結果から収束性がもっとも良い 1.7 kV に  $V_{ext}$  を固定して、PG 材質実験を行うこととした。

#### 4.3 電極材質の違いが負イオン電流へ与える影響

前節までの結果から運転条件を  $P_{net} : 2.5 \text{ kW}$ 、 $P_{gas} : 0.13 \text{ Pa}$ 、 $V_{ext} : 1.7 \text{ kV}$ 、 $V_{acc} : 10 \text{ kV}$  とし、電極材質を順次変更して PG 材質の違いが負イオン電流へ与える影響を調べた。実験では Cs を添加し、PG 温度特性、光電子電流と負イオン電流の相関、仕事関数と負イオン電流の相関を測定した。一連の実験方法について電極材質が Cu の場合を例に説明する。Fig. 4.7 に実験結果を示す。横軸は PG 温度、縦軸は負イオン電流である。まず Cs 無添加時(Pure Volum)の負イオン電流量を測定した(※■)。次に PG 温度を約 170°C に保ったまま一定量の Cs を添加した上で、PG 温度を変化させ、負イオン電流の PG 温度依存性を測定した(※●、○)。これを PG 温度依存性が安定するまで Cs 添加を繰り返し行った(※▲、△、×、◆)。並行して、仕事関数を求めた。以上のことを、PG 材質を変更してそれぞれについて同様に行った。以下にそれぞれの特性について結果を示す。

##### 4.3.1 光電子電流量と仕事関数の相関性

488 nm の  $\text{Ar}^+$  レーザの光電子電流とその時の仕事関数との相関関係を調べた。結果を Fig. 4.8 に示す。グラフからそれぞれの電極材質個々に関しては、仕事関数が低くなれば光電子電流も高くなる傾向を示した。光電子電流増加が仕事関数低下と相関していることが分かる。しかし、異種の電極間における仕事関数の比較においては、Fig. 4.9 に例を示すように、光電子電流が大きく異なっても、算出される仕事関数には殆ど差がみられない場合がある。このため、異種の電極における比較では、光電子電流値での比較ではなく、仕事関数そのものによる比較が必要であることが分かった。

##### 4.3.2 PG 温度依存性

4.3 において示した例と同様にして、それぞれの電極材質において負イオンビームを引き出し、加速電流の PG 温度依存性を調べた。加速電流  $I_{acc}$  の特性を Fig. 4.10 に、負イオン電流  $I_H$  の特性を Fig. 4.11 に示す。横軸は PG 温度、縦軸はイオン源で消費されたマイクロ波のパワー  $P_{net}$  が 2.4~2.9 kW と変動幅をもったため、 $P_{net}$  で規格化した値 (=規格化負イオン電流値:  $I_H/P_{net}$ ) で示す。グラフ下部にはそれぞれの電極材質での Pure Volum 時の値も掲載した。各電極材質における規格化負イオン電流値の最大値とその時の PG 温度を Table

1 にまとめた。

Table 1 Max  $I_{H-}/P_{net}$  and  $T_{PG}$  of five grid materials.

PG material	Au	Ag	Cu	Mo	Ni
MAX $I_{H-}/P_{net}$ [mA/kW]	20.7	15.9	15.6	15.0	17.6
Optimum $T_{PG}$ [deg]	—	260	310	230	290

この表から分かるように、Au 電極の場合、従来用いられていた電極材質である Cu や、Mo での負イオン生成効率を 30%程度上回る結果を示した。また、最適な PG 温度、つまり最大の負イオン電流値が得られた温度も材質ごとに異なった。特に Au では、本実験の測定温度範囲において負イオン電流は温度の上昇とともに増加し続け、低下するところまでには至らなかった。このように、電極材質によって最適温度が異なるのは Cs 原子と PG 表面との吸着力が材質によって異なるためと考える。つまり、たとえ同じ温度であっても、セシウム原子層の厚さが材質の違いによって異なるためと考えられる。

#### 4.3.3 仕事関数との相関性

Fig. 4.7 に示した Cu 電極と同様に他の電極でもいくつかの条件において仕事関数を測定し、負イオン電流値との相関関係を Fig. 4.12 にまとめた。横軸に仕事関数、縦軸に規格化負イオン電流値  $I_{H-}/P_{net}$  をプロットした。Pure Volume 時の仕事関数は文献[9]を参考にプロットした。それぞれの電極材質において本実験で得られた最小仕事関数を Table 2 にまとめた。

Table.2 Minimum work function of five grid materials.

PG material	Au	Ag	Cu	Mo	Ni
Minimum work function[eV]	1.42	1.56	1.55	1.55	1.57

Fig.4.12 をみると、その電極材質によらず負イオン電流値は仕事関数が 2 eV 以下で急激に増加している。負イオン生成量の違いは電極材質が到達する仕事関数の差から生まれ、たとえ異電極間であってもその時の仕事関数が同じであれば負イオン電流量にも違いが見られなかった。すなわち、負イオン電流値は電極材質に依存するのではなく、その時の PG の仕事関数によっておおよそ一意的に決まることが明らかになった。

#### 4.4 PG 表面への W 堆積が負イオン生成効率へ与える影響

マイクロ波放電と異なり、現状の大電流負イオン源ではフィラメントを用いたアーク放電が主流となっている。この生成方法の場合、フィラメント材料であるタングステン W が

PG 表面に蒸着することになる。このような場合の負イオン生成量がどのように変化するか、またその際の PG 表面の仕事関数はどうなるかは非常に興味深い。これらについて明らかにするために、イオン源にタングステンフィラメントを取り付け、タングステンを堆積させ、PG 表面が W で覆われた際の負イオン電流値の変化について調べた。

#### 4.4.1 Cs 添加前にタングステンを堆積させ、予め W 層を形成した場合

φ 1.5 mm のフィラメントを 2 系統配置し、プラズマはマイクロ波によって生成させフィラメントを 13 V、140 A で通電し加熱することで、2 時間にわたって W を放出させ PG 表面に堆積させて W 電極を形成した。その後、4.2 で示した測定を行った。結果を他の電極材質と併せ、 $I_{acc} \cdot I_H$  それぞれによる評価を Fig. 4.13、4.14 に示す。W 電極としては  $T_{PG} 190^\circ\text{C}$  で規格化負イオン電流値 14.5 mA/kW を示し、今回用いた他の 5 電極のいずれよりも下回る結果となった。

#### 4.4.2 Cs と W を同時堆積させる場合

次に Cs を十分量 (約 2.5 g) 添加した上で、同フィラメントより W を堆積させ、負イオン電流と仕事関数へ与える影響を調べた。W を堆積させる間はマイクロ波を入射し、プラズマを点弧した状態で行った。W を堆積させる PG の母材は Cs を添加した際、安定した特性が得やすかった Cu とし、PG 温度は Cs/Cu 表面で最大値が得られる  $310^\circ\text{C}$  前後に固定し実験を行った。結果を  $I_{acc} \cdot I_H$  それぞれによる評価を Fig. 4.15、4.16 に示す。横軸はフィラメントへの通電時間の積算値で、縦軸は規格化負イオン電流値である。W 無添加時の Cs/Cu において負イオン電流値は 17.6 mA/kW であった。フィラメントを加熱 (8 V、100 A で 10 ~ 30 秒通電) すると、15 mA/kW 程度まで低下した。これはフィラメント周辺の不純物が放出され PG 表面に影響を与えたものと考えられる。その後、12 V、135 A で通電を繰り返し、W を徐々に堆積させていくと、負イオン電流値は徐々に上昇し 20 mA/kW 程度で一度飽和した。さらに加熱電力を 14 V、142 A まで上げ、W の堆積量を増すと、負イオン電流は再び増加し、最大 24.6 mA/kW をピークに減少に転じ、21 mA/kW 程度に落ち着いた。本実験では W の堆積後は Cs を新たに添加することはしなかったため、W 蒸着が過多になり、仕事関数が上昇して負イオンが減少したと考えられる。最大値 24.6 mA/kW は Mo、Cu 電極の最大値を約 60%、Au 電極を約 20% 上回る結果であった。他の電極材質と同様に仕事関数を測定したものを Fig. 4.17 に示す。予め W を堆積させて W 層形成した場合 (▼:W)、Cs を添加した後 W を堆積させる場合 (▲:Cs+W) のいずれの際も他の電極同様に負イオン電流量は仕事関数に対しておよそ一意性を示している。

Fig. 4.15 のビーム電流量が 24 mA/kW 程度に安定した状態で、次にフィラメントに通電している間のマイクロ波入射を止め、プラズマを点弧しない状態で W の堆積を行った。PG 温度は同じく  $310^\circ\text{C}$  前後を維持した。結果を Fig. 4.18 に示す。グラフ中に示す“○”の時点でフィラメントの通電を開始しており、それぞれの通電時間を併せて掲載した。結果を見ると、

フィラメント通電時間が長くなり、W 堆積量が増すほど W 堆積直後の負イオン電流値は低下するが、数回の放電を繰り返すことによりいずれも 24 mA/kW 程度まで回復している事が分かる。これは先ほどとは異なり、W 堆積時にプラズマが点弧していないために PG 面は一時的に W 過多状態となり、仕事関数が増大し、負イオン電流量が低下したと考えられる。W 堆積後、プラズマを点弧することでチャンバ内壁面に付着していた Cs が蒸発し、PG 面へ再付着して W とおり混ざることによって W 過多状態が改善される結果、負イオン電流値もおおよそ元の値まで回復したと思われる。

以上の結果から、負イオン電流は材質によって異なるが、それは到達しうる最低仕事関数が材質によって異なるためである事が分かった。即ち、材質の違いそのものにより負イオン生成量が変わるのではなく、PG の仕事関数が材質によって変わるために負イオン生成量も変わり、負イオン生成量が仕事関数で一意的に決まることが明らかになった。その関係はフィラメントからの W の堆積があっても同様であり、Cs を添加した後にフィラメントにより W を少量添加した際の負イオン電流値は今回実験した他の 5 電極を上回る結果であった。このように新鮮なタングステンの蒸着によってより低い仕事関数が得られる理由として、以下のことが考えられる。本研究における真空度程度においては金属表面には酸化層が形成されており、それがセシウム添加時の仕事関数に影響し、ひいては負イオン生成に影響を与えているものと考えられる。低仕事関数面を形成させるには、常にフィラメントから酸化されていない新鮮な金属粒子が PG へ供給されることに加え、それらと Cs がおり混ざった表面が形成されることが重要であると思われる。Fig. 4.18 の過剰な W 堆積からの負イオン電流値の回復結果もこのことから説明できる。

## 5. まとめ

プラズマ電極表面生成が水素負イオンビームへ与える影響を実験的に調査した結果、以下の事が明らかになった。

1. 電極材質によって負イオン電流量の最大値は異なり、それはセシウムを添加した際の最小仕事関数が異なるためである。たとえ異電極間であっても、PG 表面の仕事関数が一致すれば得られる負イオン電流値は等しい。
2. 電極材質を変えて実験した中では Au 電極が負イオン電流値 20.7 mA/kW の結果を示し、従来電極である Mo、Cu のそれを 30% 程度上回る結果を示した。このとき Au 電極の仕事関数は Mo、Cu 電極に比べて約 0.1 eV 低かった。
3. PG 表面に Cs を添加した上で W を堆積させたことにより得られる PG 表面の仕事関数は今回実験した他の 5 電極より小さく、負イオン電流値も 24.6 mA/kW と最大値を示した。一方、

W堆積後にCsを添加した場合は19.2 mA/kWが最大であったことから、低仕事関数面を形成させるには酸化されていないWとCsがおり混ざった表面が形成されることが重要であると考える。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、装置の運転保守に多大なご協力を頂きました原子力エンジニアリング(株)の阿部宏幸氏、有意義な議論や助言を頂いた加熱工学研究室の皆様へ感謝致します。さらに、本論文をまとめるにあたって有益なコメントを頂いた山本巧NBI装置試験室長へ感謝致します。また、本研究を行う機会と激励を頂きました関昌弘核融合工学部長、松田慎三郎那珂研究所所長に深く感謝致します。

#### 参考文献

- [1] Y. Okumura, Y. Fujiwara, T. Inoue, K. Miyamoto, N. Miyamoto, A. Nagase, Y. Ohara, and K. Watanabe, Rev. Sci. Instrum. **67**, 1092(1996)
- [2] T. Kuroda, O. Kaneko, Y. Takeiri, Y. Oka, K. Tsumori, E. Asano, T. Kawamoto, R. Akiyama, A. Ando, T. Takanashi, and M. Hamabe, Rev. Sci. Instrum. **67**, 1114 (1996).
- [3] T.Inoue, M.Hanada, M.Mizuno et al. "Development of multi-ampere H<sup>-</sup> ion source at jaeri", Particle And Fields 53,316(1994)
- [4] K.N. Leung, S. R. Walther and W. B. Kunkel, Phys. Rev. Lett. **62**, 764 (1989).
- [5] M. Kashiwagi et al, 'Optimization of Plasma Grid Material in Cesium-Seeded Volume Negative Ion Source', Proc. 9th Int. Conf. on Ion Sources(ICIS01), Oakland, USA, p120, 18.19, (2001).
- [6] R.H.Fowler: Phys.Rev.**38**(1931)45.
- [7] T.Inoue, K.Miyamoto, M.Mizuno, et al., "A merging preaccelerator for high current H<sup>-</sup> ion beams" Rev.Sci Instrum,**66**,(7),(1995)
- [8] M.Taniguchi et.al., "Development of High Performance Negative Ion Sources and Accelerators for MeV Class Neutral Beam Injectors", will be published in Proceedings of the 19th IAEA fusion energy conference, Lyon,(2002).
- [9] 「表面化学の基礎と応用」,日本表面科学会編,フジ・テクノシステム株式会社

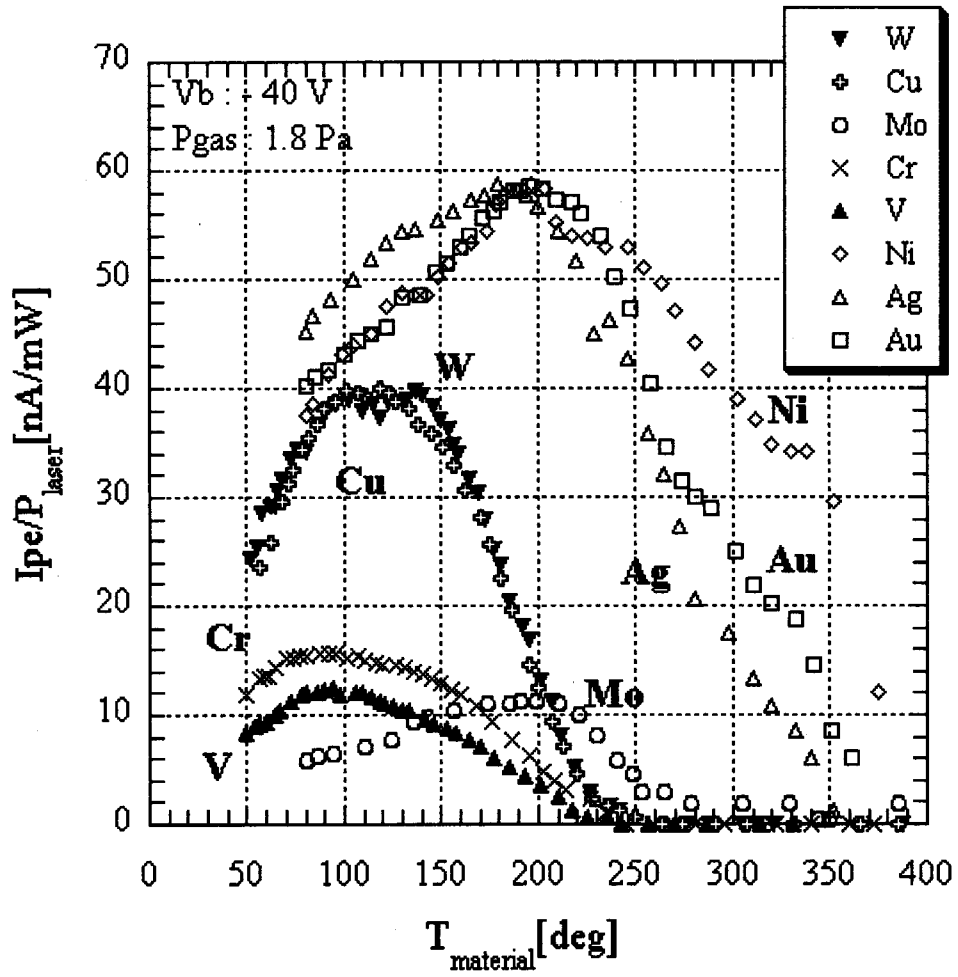


Fig.2.1 各電極材質における光電子電流量の温度依存性.

(※Rev : M.Kashiwagi et.al, 'Optimization of Plasma Grid Material in Cesium Seeded Volume Negative Ion Source', Proc.9th Int Conf on Ion Sources(ICIS01),Oakland, USA, p120,18.19,(2001))



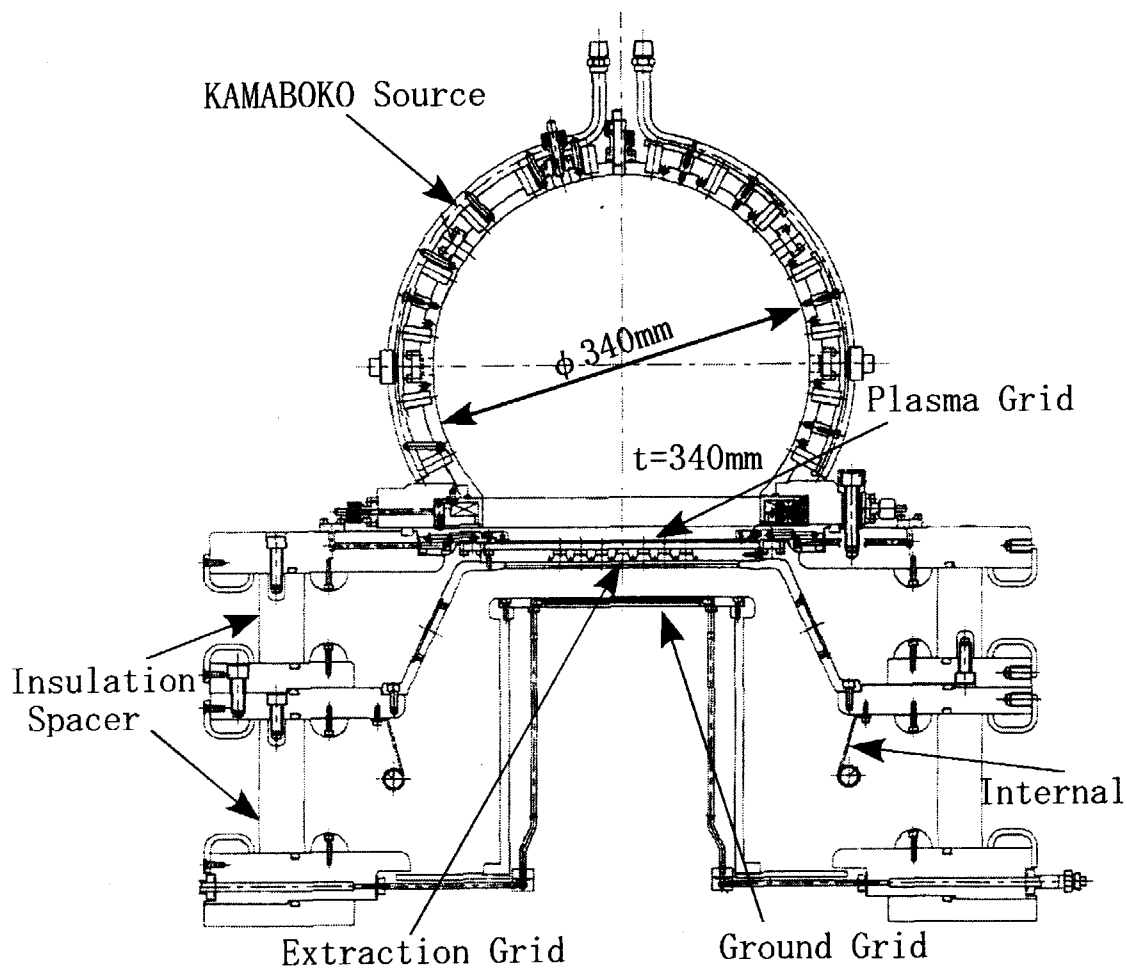
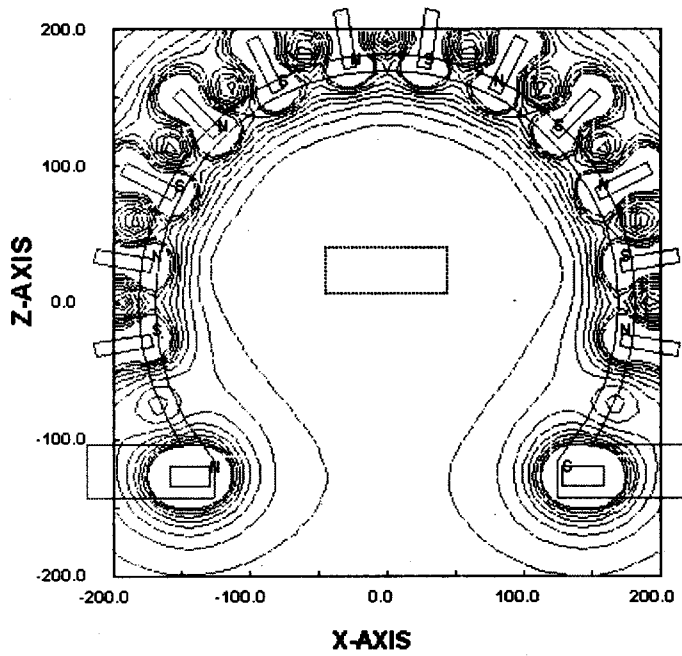


Fig.3.1 イオン源断面図



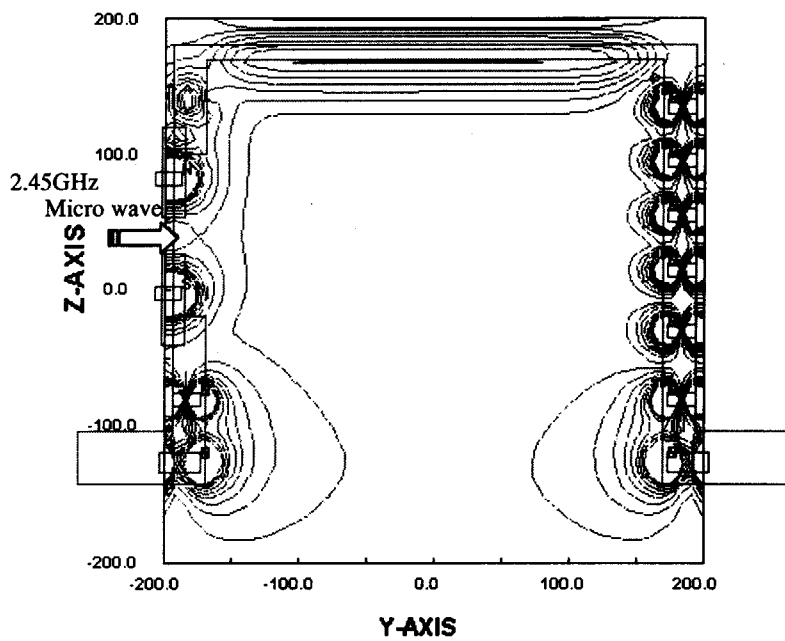
CONTOUR VALUE

- 1 100.00
- 2 200.00
- 3 300.00
- 4 400.00
- 5 500.00
- 6 600.00
- 7 700.00
- 8 800.00
- 9 900.00

Y= 0.00

UNIT L: mm  
B: gauss

(a)



CONTOUR VALUE

- 1 100.00
- 2 200.00
- 3 300.00
- 4 400.00
- 5 500.00
- 6 600.00
- 7 700.00
- 8 800.00
- 9 900.00

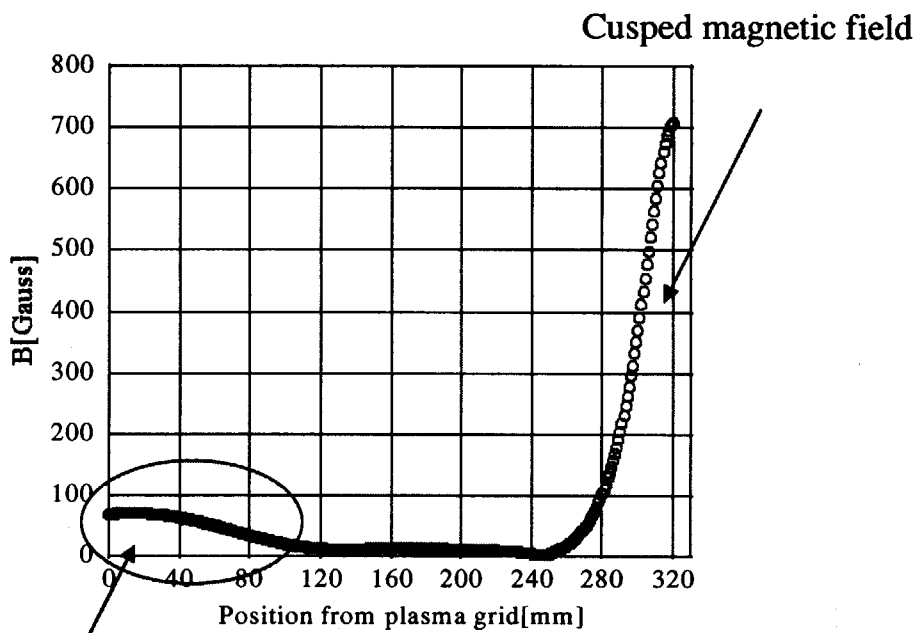
X= 0.00

UNIT L: mm  
B: gauss

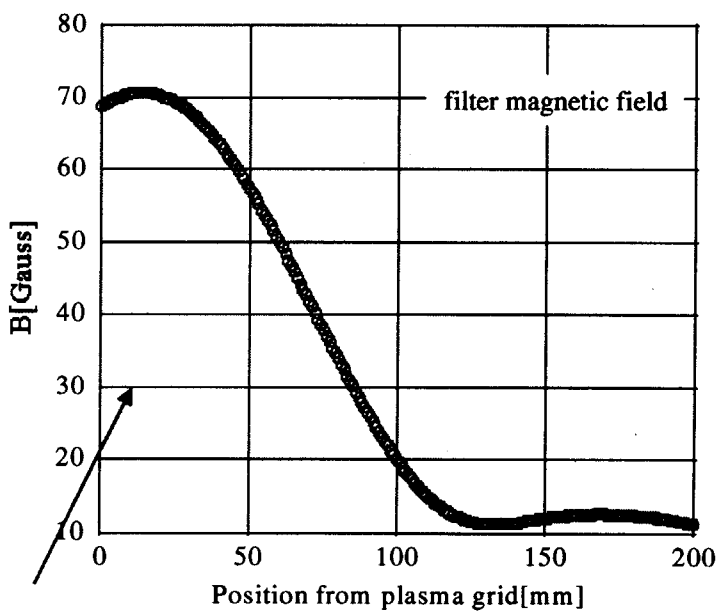
(b)

Fig.3.2 磁場配位図

(マイクロ波入射方向に対して、(a)垂直方向 (b)水平方向)



(a) 全体図



597Gauss·cm

(b) フィルター領域

Fig.3.3 ビームライン方向の磁場配位

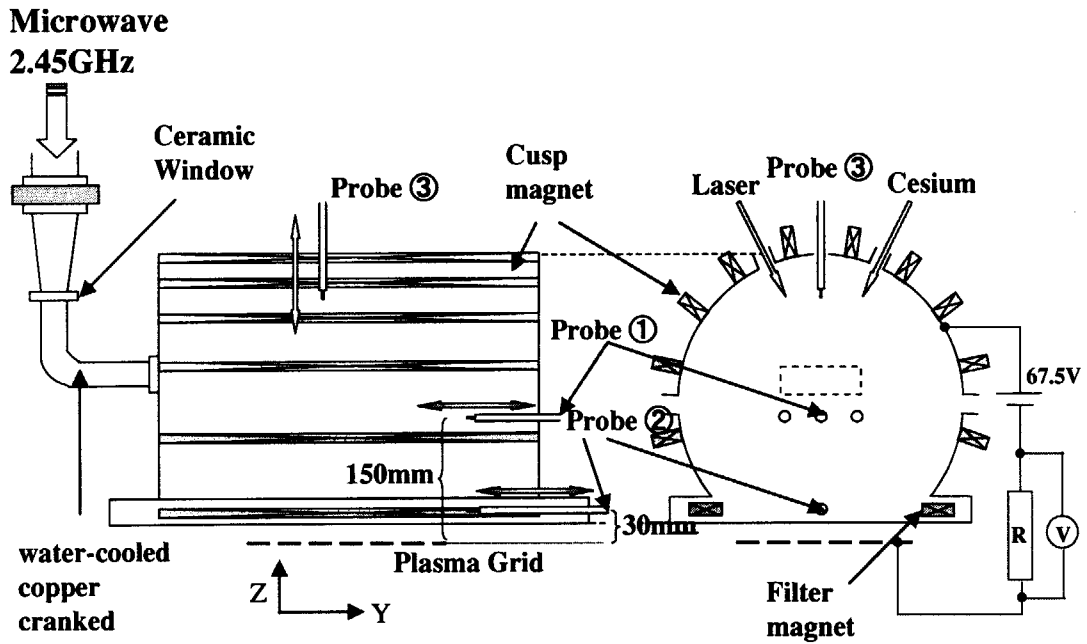


Fig.3.4 アークチャンバへの測定器・装置配置図

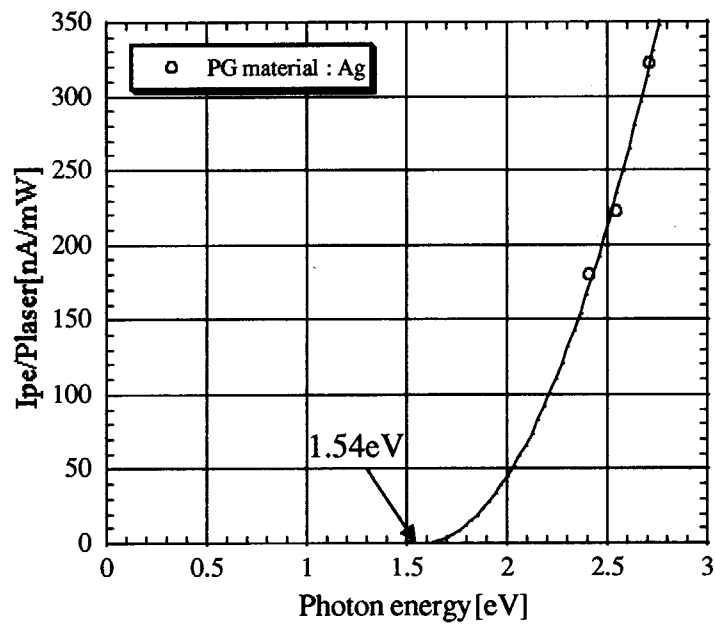


Fig.3.5 仕事関数算出例

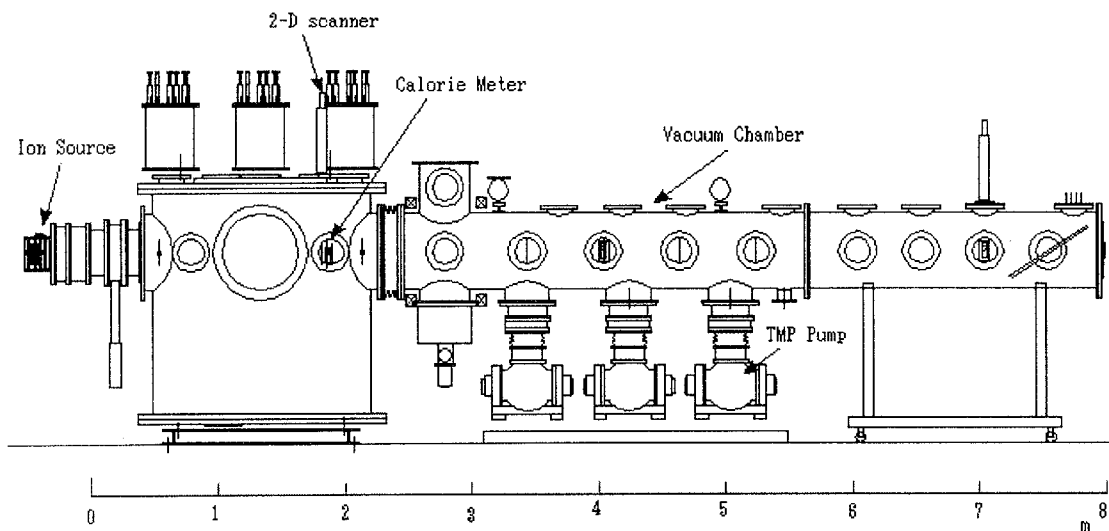


Fig.3.6 負イオン源テストスタンド ITS-2M の構成

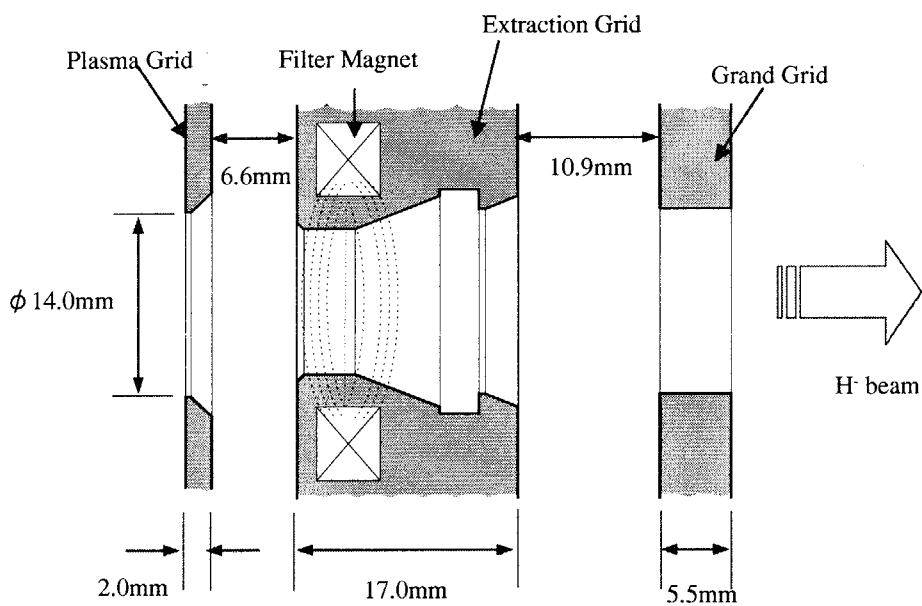


Fig.3.7 電極孔形状

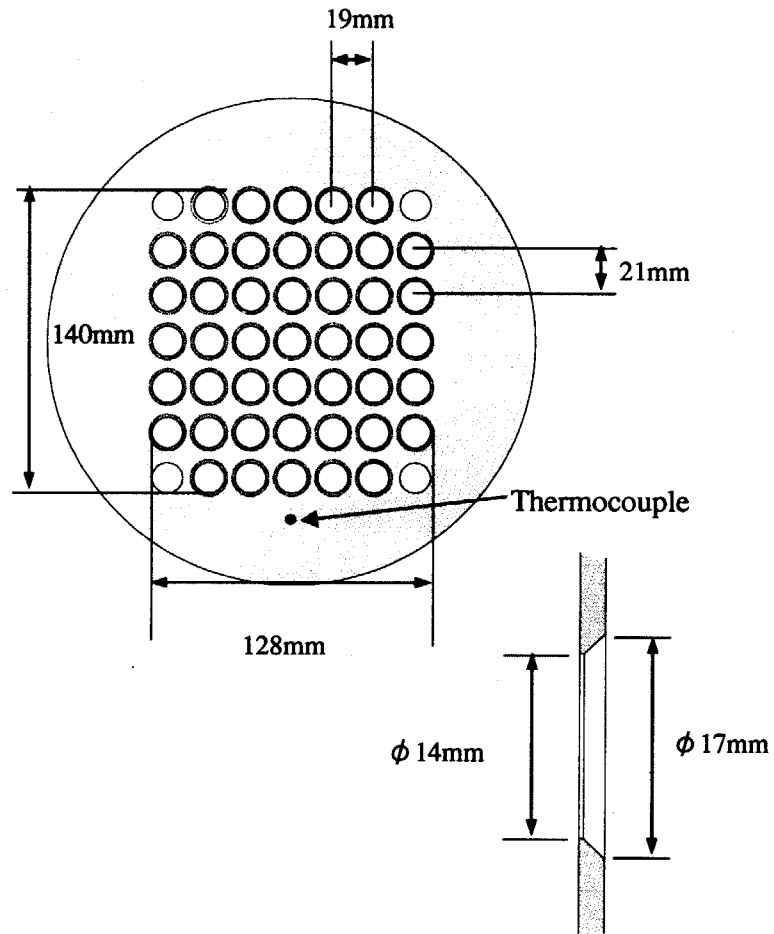


Fig.3.8 プラズマ電極

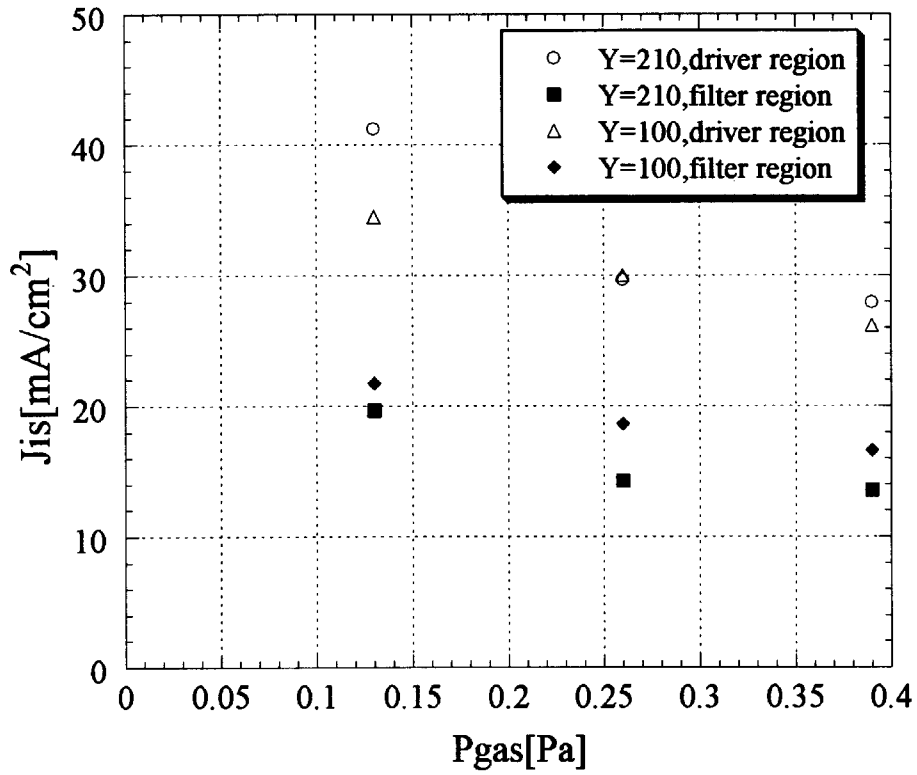


Fig.4.1 イオン飽和電流のガス圧特性

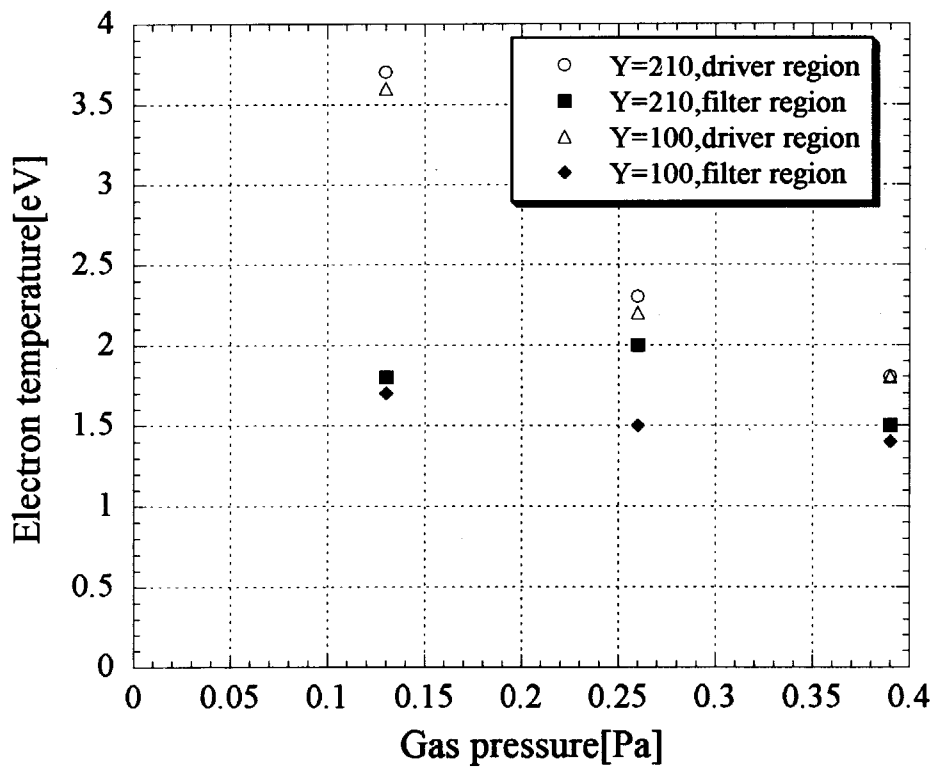


Fig.4.2 電子温度のガス圧特性

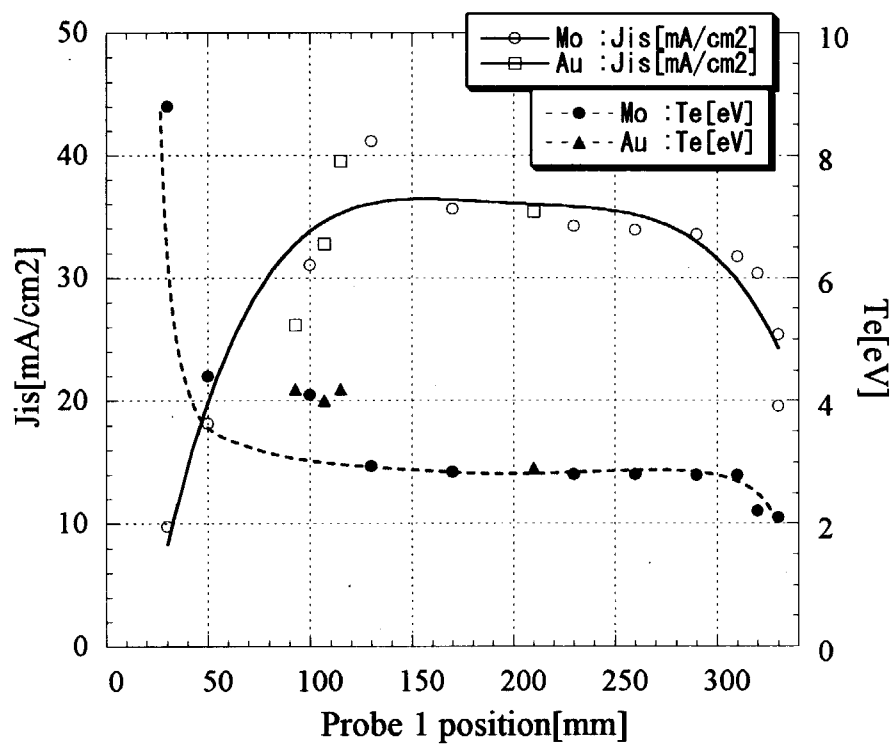


Fig.4.3 ドライバ領域のイオン飽和電流と電子温度分布

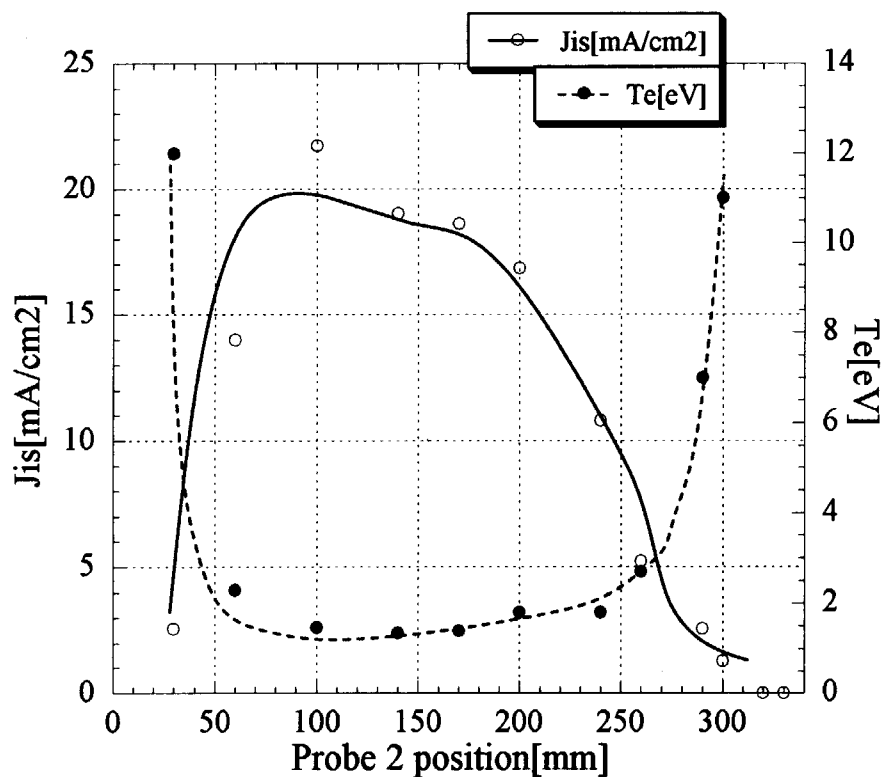


Fig.4.4 フィルター領域のイオン飽和電流と電子温度分布



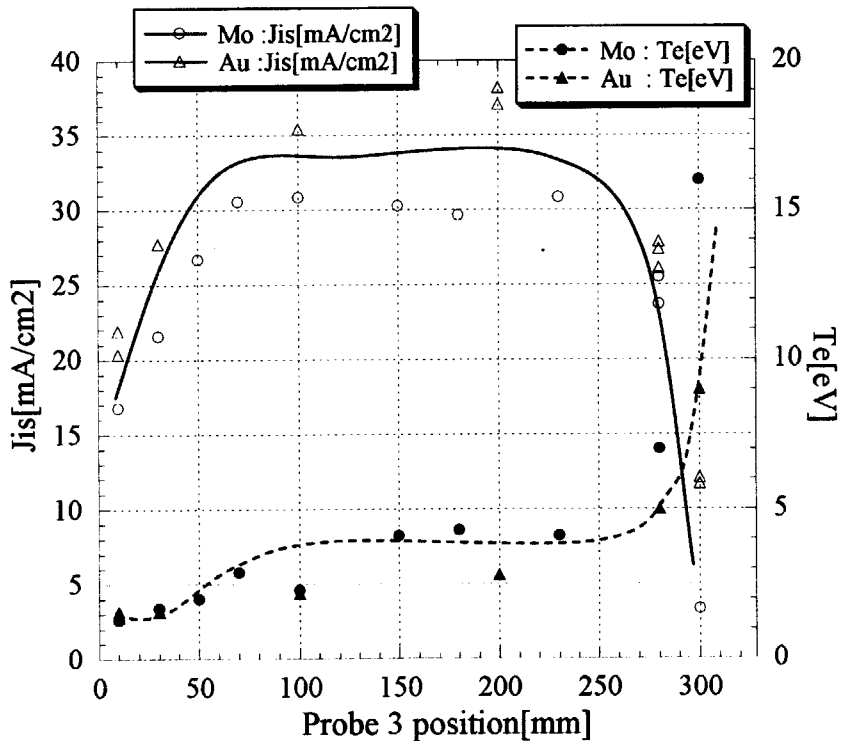


Fig.4.5 ビームライン方向のイオン飽和電流と電子温度分布

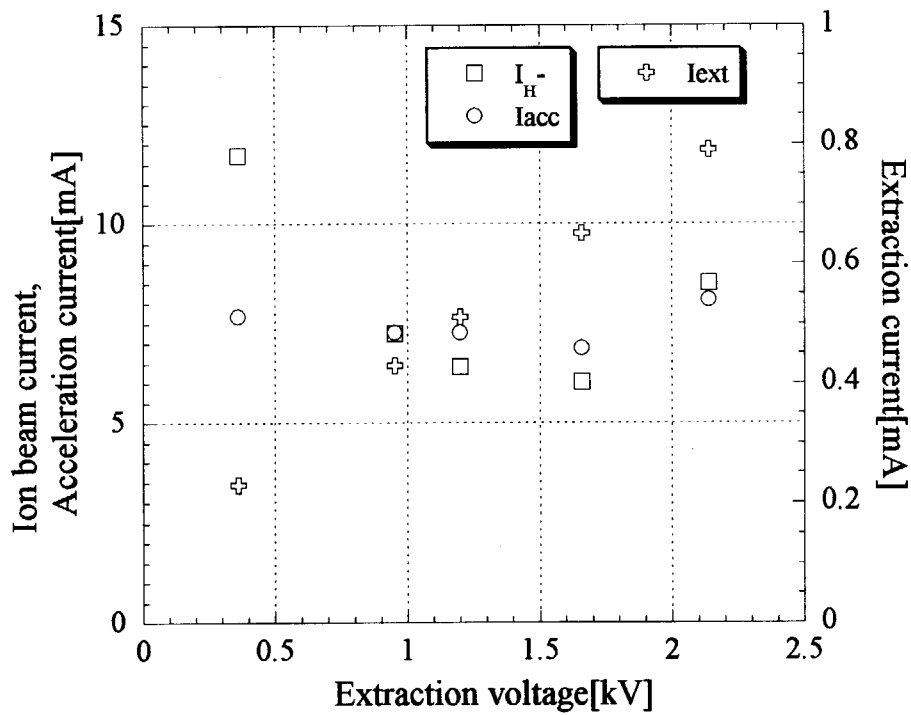


Fig.4.6 引き出し電圧特性

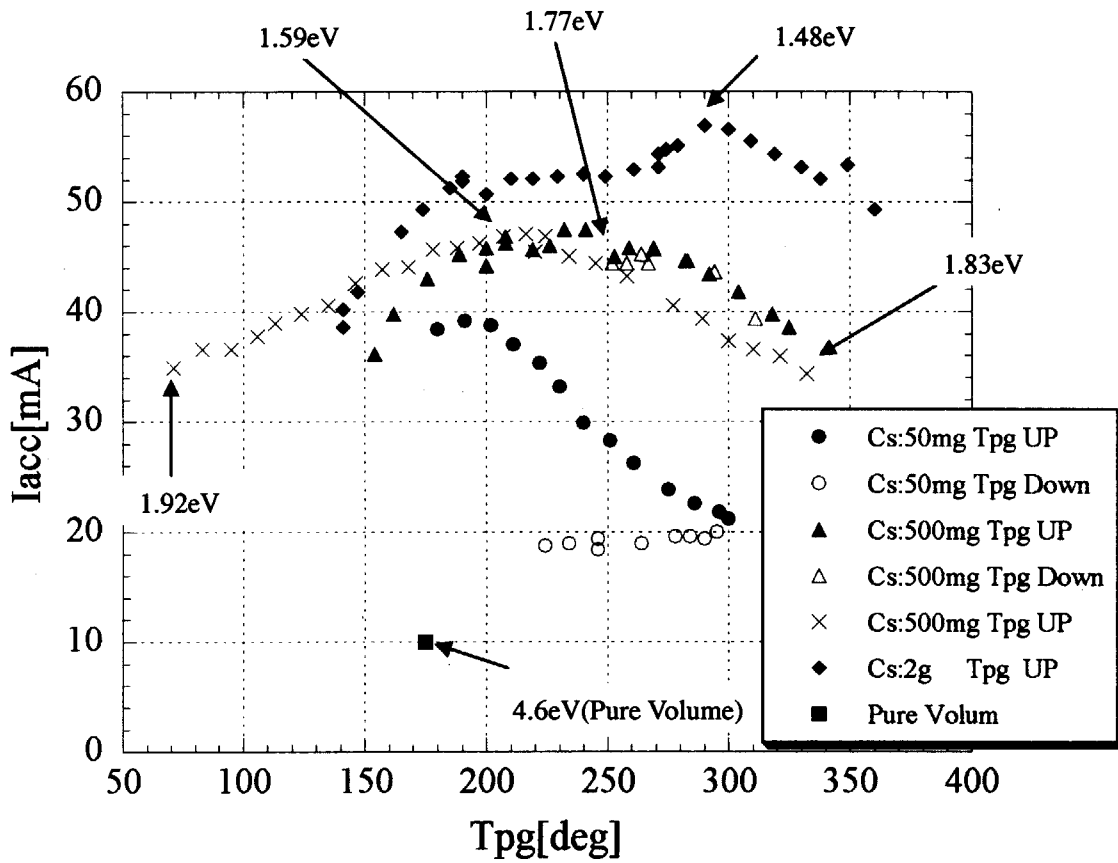


Fig.4.7 ビーム電流と仕事関数の PG 温度依存性(Cu 電極)

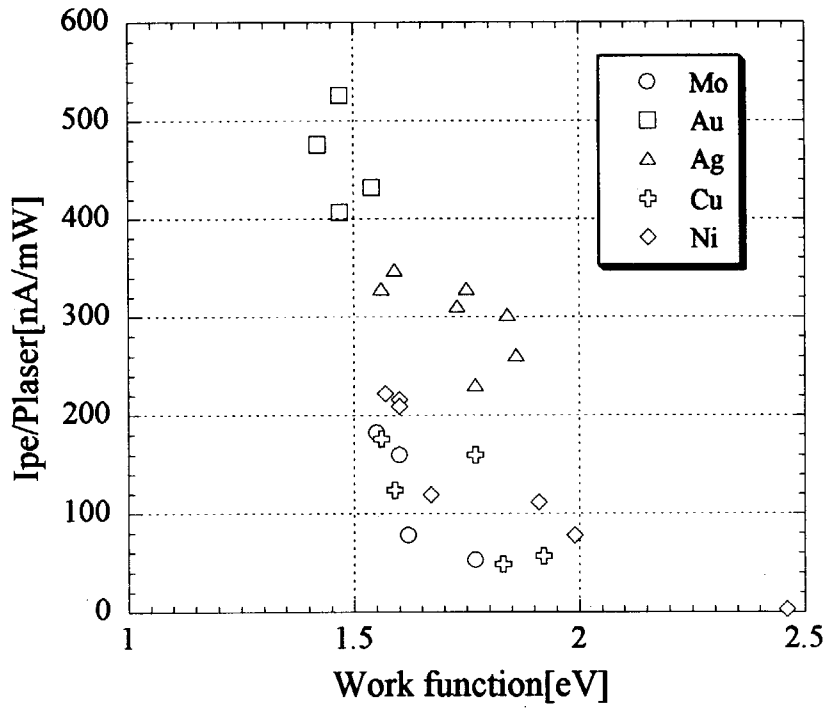


Fig.4.8 各電極材質における光電子電流－仕事関数特性

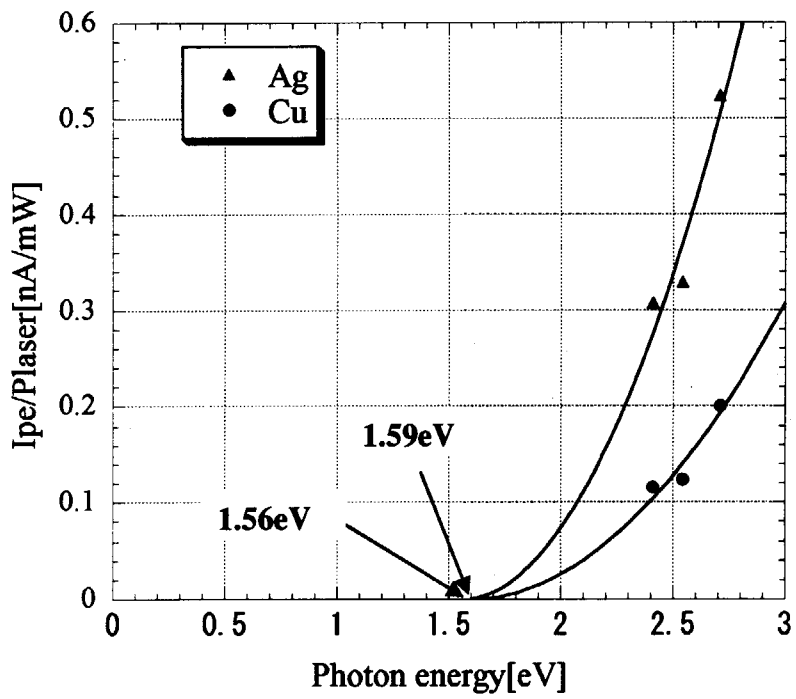


Fig 4.9 光電子電流と仕事関数の相関性.

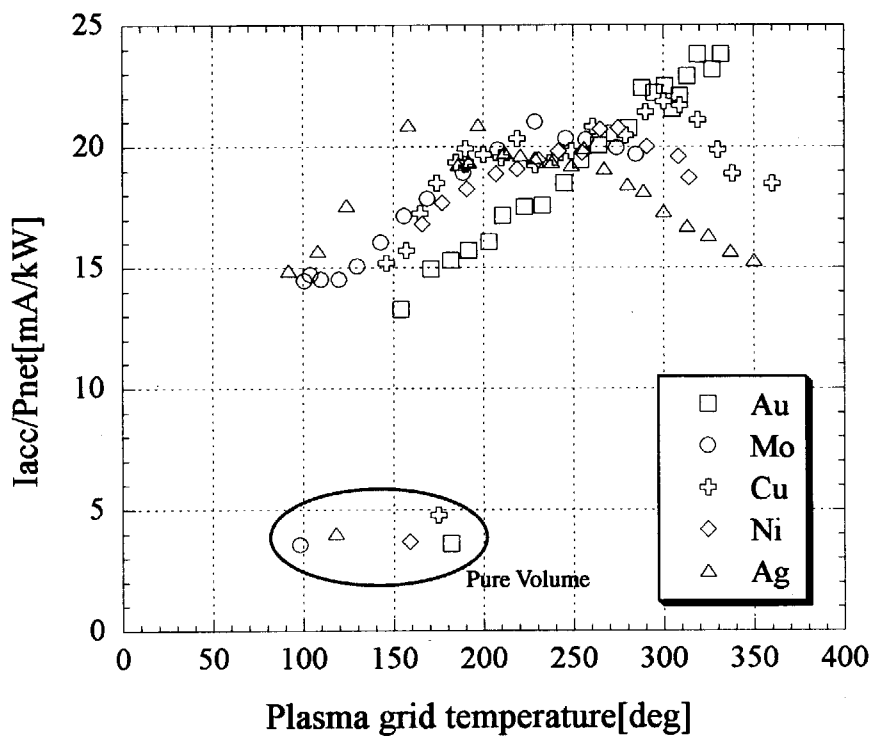


Fig.4.10 各 PG 材質におけるビーム電流( $I_{acc}$ )の PG 温度特性.

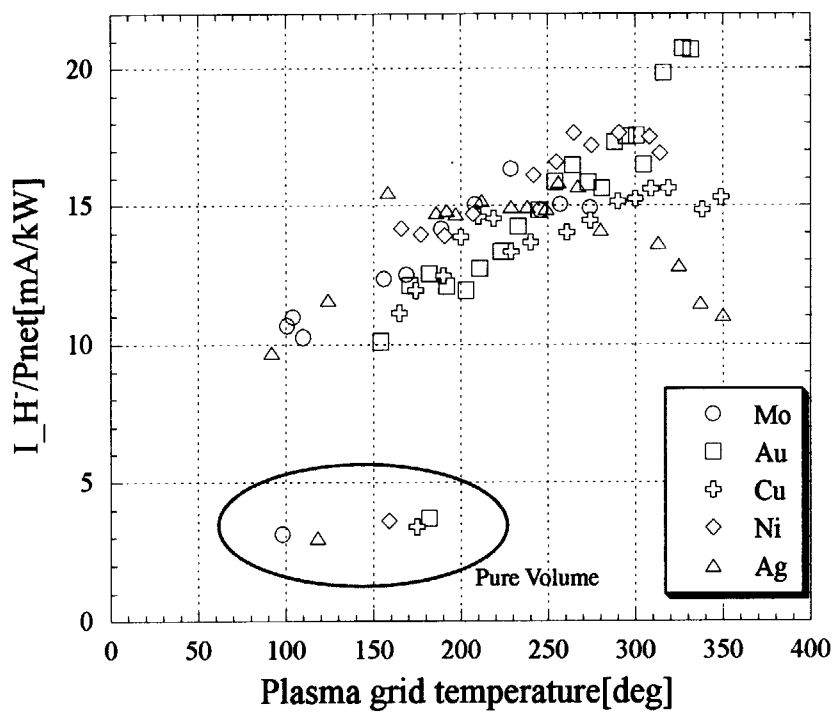


Fig.4.11 各 PG 材質におけるビーム電流( $I_H$ )の PG 温度特性.

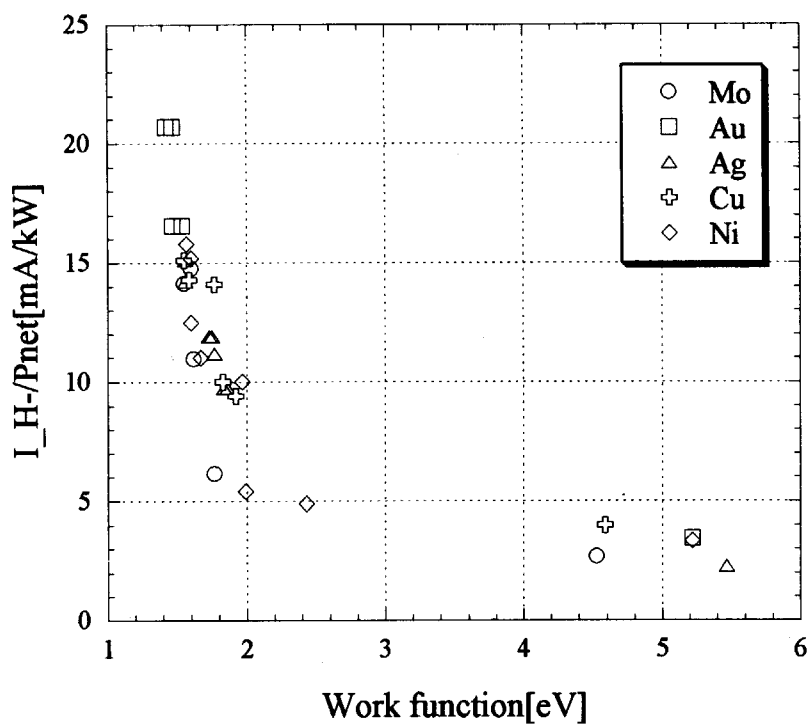


Fig.4.12 PG 材質別の仕事関数と負イオン電流の相関性.

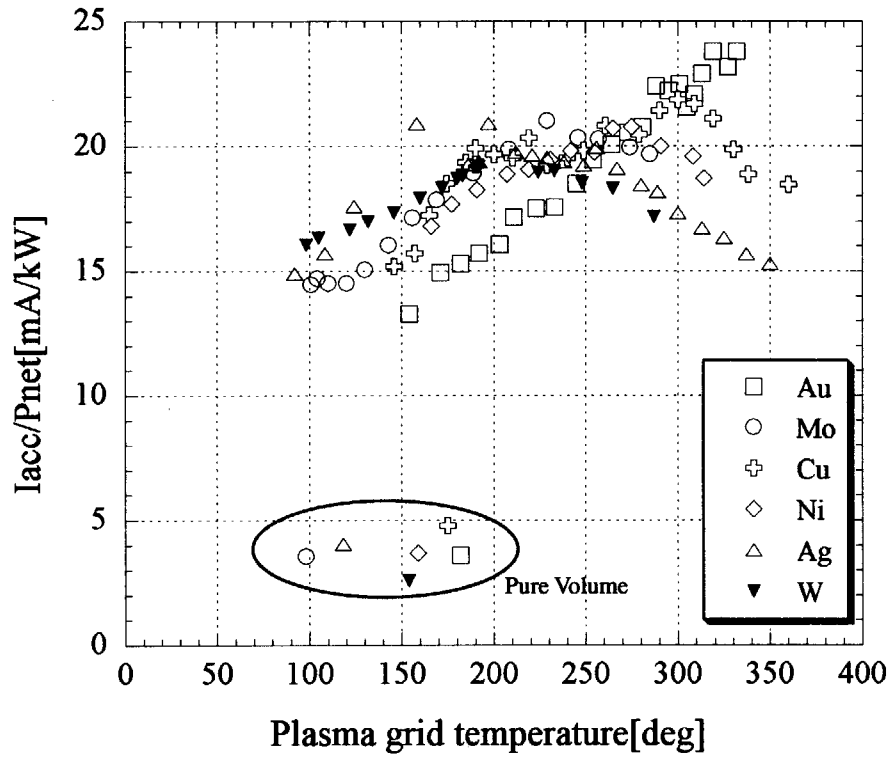


Fig.4.13 W 堆積面におけるビーム電流(I<sub>acc</sub>)の PG 温度依存性

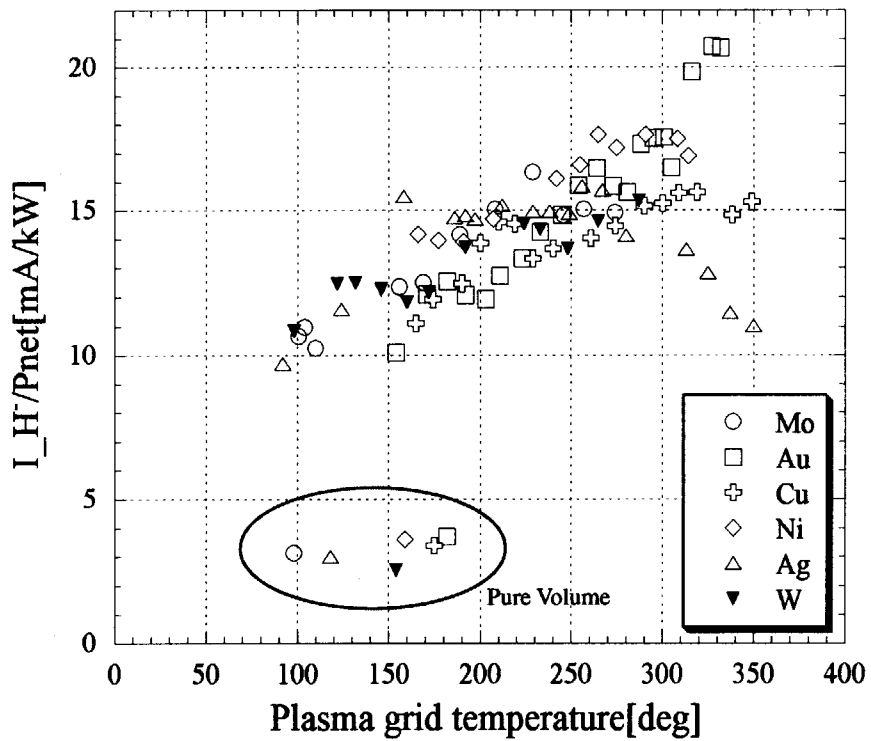


Fig.4.14 W 堆積面におけるビーム電流(I<sub>H</sub>)の PG 温度依存性

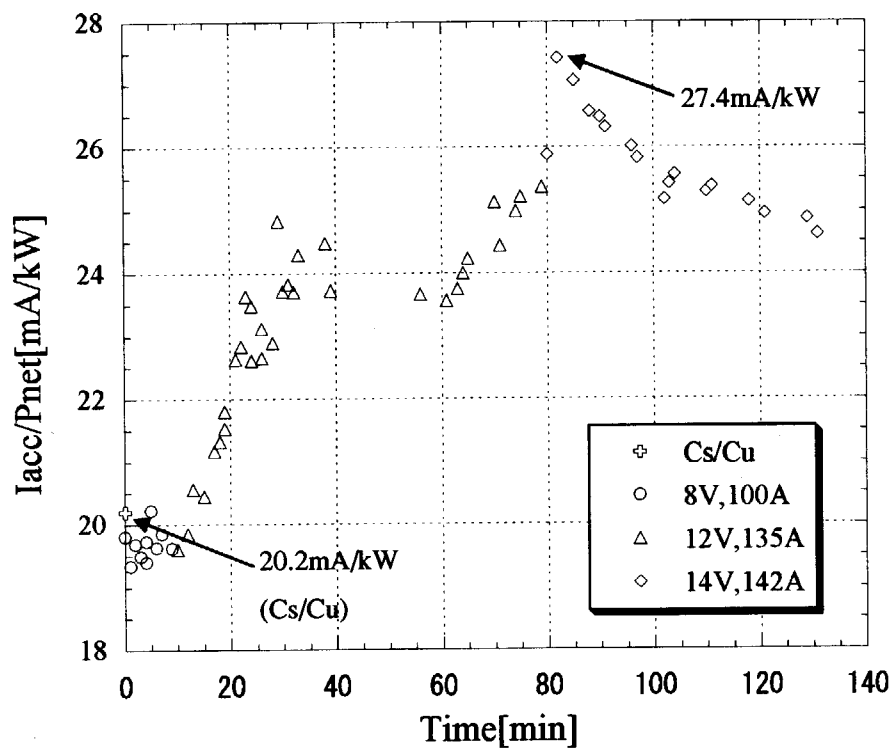


Fig 4.15 ビーム電流( $I_{acc}$ )の W 堆積量依存性

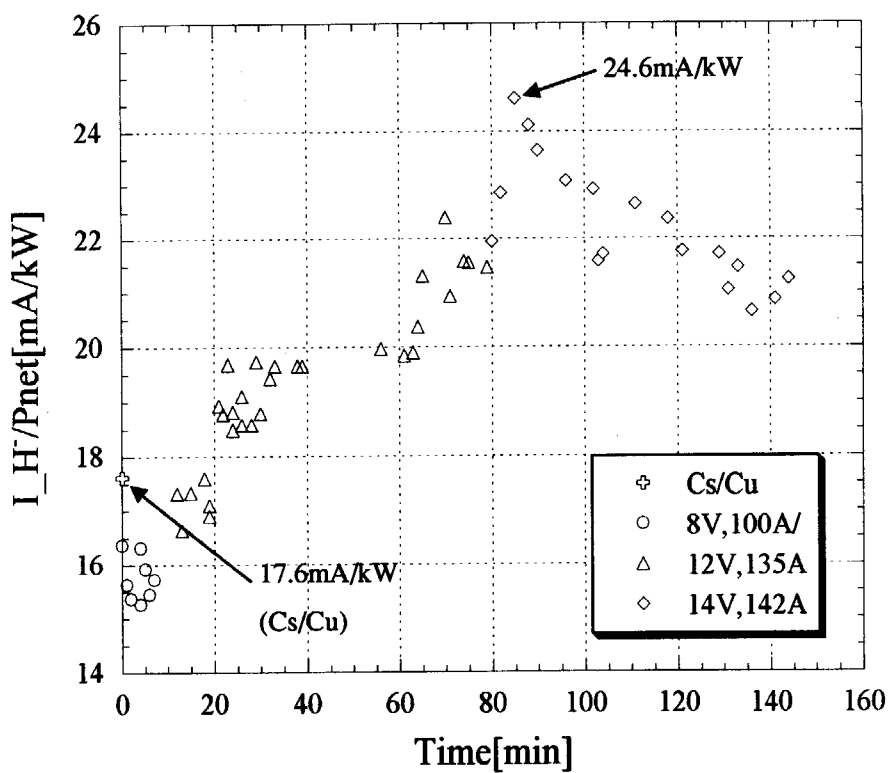


Fig 4.16 ビーム電流( $I_H$ )の W 堆積量依存性

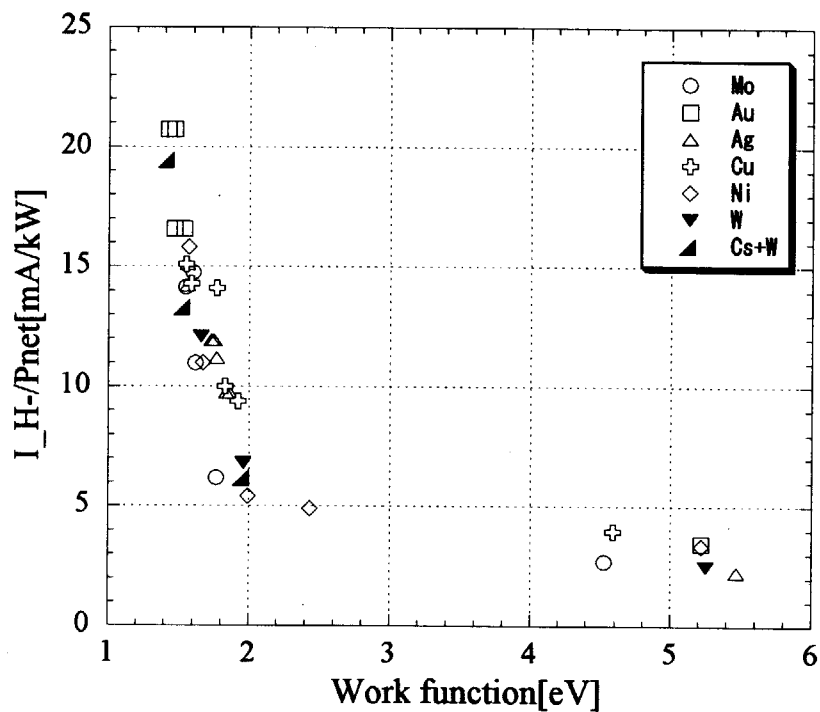


Fig.4.17 W 堆積面におけるビーム電流量と仕事関数の相関性

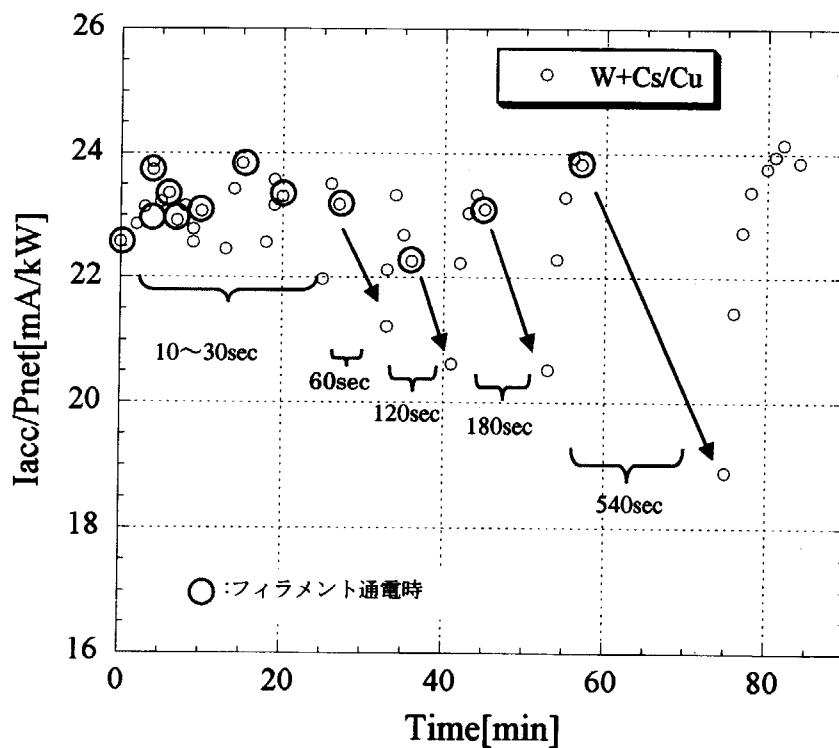


Fig.4.18 W 過多堆積の影響と Cs リサイクリング効果



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
 1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
 1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
 1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
 1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
 1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
 1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
 1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
 1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1 5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s (= N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))  
 動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
 = 4.184 J (熱化学)  
 = 4.1855 J (15 °C)  
 = 4.1868 J (国際蒸気表)  
 仕事率 1 PS (仏馬力)  
 = 75 kgf·m/s  
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

セシウム添加型負イオン源におけるプラスマ電極材質の違いが負イオン生成に与える影響

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています