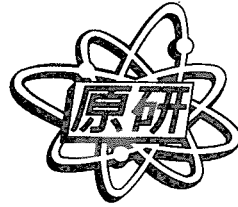


JAERI-Tech
2001-046



JP0150732



直流アーク放電型プラズマ中性化セルの開発

2001年 6月

柏木 美恵子・奥村 義和・花田 磨砂也・森下 卓俊・渡邊 和弘
折田 善崇*・堀池 寛*・井門 俊治*

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刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

直流アーク放電型プラズマ中性化セルの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

柏木 美恵子・奥村 義和・花田 磨砂也・森下 卓俊・渡邊 和弘
折田 善崇*¹・堀池 寛*²・井門 俊治*³

(2001年5月18日受理)

核融合プラズマの加熱や電流駆動に用いられている負イオンを用いた高エネルギー中性粒子入射装置 (NBI) の効率は、イオンビームを中性粒子に変換する中性化効率に大きく依存する。このため現在使われているガス中性化セルの中性化効率 60% に対して、80% 以上の中性化効率を得られるプラズマ中性化セルの開発が重要である。本研究ではプラズマ中性化セルの実現に向けて、アーク放電型の円筒形多極磁場型大容量プラズマ源 (長さ 2000mm x 直径 600mm) を設計製作し、プラズマ生成実験を行った。プラズマの閉じ込め性能の特性を比較するために、小型の円筒形プラズマ源 (長さ 1400mm x 直径 320mm) での試験も実施した。その結果、閉じ込め性能の高いプラズマ源では低ガス圧で電離度の高いプラズマが得られることが確認され、その結果は数値解析による傾向と一致した。更に高電離プラズマ生成を目指してアルゴンを用いたプラズマ生成実験を行い、中性化実験に必要な電離度 (10%) とプラズマ線密度 ($4.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$) を得た。また、アークパワー 30kW、0.027Pa において 17% の電離度を得た。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

*1 大阪大学大学院工学研究科 (現所属：シャープ (株))

*2 大阪大学大学院工学研究科

*3 埼玉大学工学部機能材料工学科

Development of Plasma Neutralizer using DC Arc Discharge

Mieko KASHIWAGI, Yoshikazu OKUMURA, Masaya HANADA, Takatoshi MORISHITA,
Kazuhiro WATANABE, Yoshitaka ORITA*¹, Hiroshi HORIIKE*² and Shunji IDO*³

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

(Received May 18, 2001)

A system efficiency of neutral beam injector(NBI) depend strongly on a neutralization efficiency of ion beam. Development of a plasma neutralizer(PN) is an attractive issue for the high power NBI, because the neutralization efficiency in PN is expected to be more than 80% which is higher than that of conventional gas neutralizers of 60%. To realize PN, a cylindrical multicusp large volume plasma source whose dimensions are 2000mm in length and 600mm in diameter was fabricated and tested. A smaller plasma source whose sizes are 1400mm in length and 320mm in diameter was also tested to compare plasma confinement properties. The results show that high degree of ionization was obtained at a lower gas pressure in the plasma generator with higher confinement property. This tendency was also confirmed by a numerical analysis. In an argon plasma discharge, a degree of ionization of 10% with the plasma line density of $4.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ was obtained, which is desirable values to demonstrate plasma neutralization experiment effectively. A high degree of ionization of 17% was obtained at 0.027Pa when an arc discharge power was 30kW.

Keywords : N-NBI, Neutralization Efficiency, Plasma Neutralizer, Multicusp,
Plasma Production, Large Volume

*1 Graduate school of engineering, Osaka University(Presently at : SHARP Co.)

*2 Graduate school of engineering, Osaka University

*3 Department of functional material science, Saitama University

目 次

1. はじめに	1
2. プラズマ中性化セルに必要なプラズマパラメータ	1
3. プラズマ中性化セルの設計	2
3. 1 プラズマ源の形状	2
3. 2 プラズマ生成に関する検討	2
3. 2. 1 全イオン損失面積 S_L	2
3. 2. 2 電子の閉じ込め時間	3
3. 3 計算機シミュレーションによる閉じ込め評価	3
3. 3. 1 電子軌道追跡シミュレーション	4
3. 3. 2 電子軌道と電離衝突点	4
3. 3. 3 高速電子の寿命評価	4
4. 実験結果と考察	5
4. 1 実験装置	5
4. 2 水素によるプラズマ生成の検討と閉じ込め性能比較	5
4. 2. 1 放電特性	5
4. 2. 2 イオン飽和電流密度	5
4. 2. 3 閉じ込め性能評価	6
4. 2. 4 アークパワー依存性	6
4. 3 アルゴンプラズマ生成実験による高電離化	7
5. まとめ	7
謝辞	7
参考文献	8

Contents

1 . Introduction	1
2 . Required Parameter for Plasma Neutralizer.....	1
3 . Design of Plasma Neutralizer.....	2
3 . 1 Configuration of Plasma Source	2
3 . 2 Investigation for Plasma Generation	2
3 . 2 . 1 Total Ion Loss Area S_L	2
3 . 2 . 2 Electron Confinement Time	3
3 . 3 Examination of Plasma Confinement by using Computational Simulation.....	3
3 . 3 . 1 Electron Orbit Simulation.....	4
3 . 3 . 2 Electron Orbit and Ionization Collision Points.....	4
3 . 3 . 3 Examination of Lifetime of Fast Electron.....	4
4 . Experimental Results and Discussions.....	5
4 . 1 Experimental Setup.....	5
4 . 2 Comparisons of Plasma Discharge between Two Sources in Hydrogen Discharge.....	5
4 . 2 . 1 Discharge Characteristics.....	5
4 . 2 . 2 Ion Saturation Current Density.....	5
4 . 2 . 3 Examination of Plasma Confinement Characteristics	6
4 . 2 . 4 Dependence on Arc Power.....	6
4 . 3 Highly Ionized Plasma Discharge by using Argon.....	7
5 . Summary.....	7
Acknowledgment.....	7
References.....	8

1. はじめに

核融合プラズマの自己点火を助け、更に電流駆動としても期待されている外部加熱方式に中性粒子ビームを入射する方式、中性粒子入射加熱 (NBI) 法がある。NBI 装置ではプラズマ源で生成したイオンを引き出し、加速管で必要なエネルギーまで静電的に加速する。そのビームはガスで充満された中性化セルを通して中性化され、中性粒子ビームとして磁気閉じ込め方式核融合プラズマに入射される。これまで NBI の効率を上げる様々な試みが行われてきた。一つは正イオンビームから負イオンビームへの移行である。200keV 以上の水素正イオンビームに対する中性化効率は 10% 以下となり国際熱核融合実験炉 (ITER) を初めとする次期核融合炉に必要な高エネルギービーム (1MeV 以上) に対して中性化効率はほぼ 0 になる。そこで原研では中性化効率 60% を維持できる負イオンビームの開発を行い、JT60 の負イオン NBI (N-NBI) で 350KeV、5.2MW[1]、MeV 級負イオン源試験装置で 1 MeV、25mA[2] の高エネルギー負イオンビーム生成を達成した。

NBI 装置の効率は、中性化効率に大きく依存するため、将来の核融合炉に向けて、更に高い中性化効率が期待されるプラズマ中性化セルの開発が注目されている。プラズマによる中性化効率は 80% 以上になると見積もられており、更にプラズマ中性化セル内のガス圧を従来型のガス中性化セルに比べて極端に低減できることから、排気容量の低減、即ちクライオポンプ等の排気機器の小型化も可能となり、システム全体の小型化と高効率化が期待されている[3]。

本研究ではプラズマ中性化セルの実証実験を行うために大容量プラズマ源を開発し、そのプラズマ生成実験を行った。プラズマ中性化セルでは、高エネルギー負イオンビームの中性化のために、高い電離度と十分なプラズマ線密度が要求される。このため、強力な磁場を用いた閉じ込め性能の高いプラズマ源が必要である。一方、プラズマを閉じこめるための磁場がビーム軌道に与える影響を可能な限り低減する必要がある。このように、プラズマ中性化セルの開発では、相反する要素の協調をとり、高密度のプラズマを生成することが重要な課題の一つである。設計においては、まず、プラズマパラメータの評価を行い、電子軌道シミュレーションにより閉じ込め性能評価を行い、多極磁場型プラズマ源を製作した。実験では、水素プラズマの各種パラメータを調べ、同時に、閉じ込め性能の劣る小型のプラズマ源とプラズマ生成特性を比較した。更にアルゴンプラズマを用いて、低ガス圧で高電離度プラズマ生成 (電離度 10% 以上) 実験を実施した。

本報告では、開発したプラズマ源の設計概念について述べ、次にプラズマの特性について報告する。

2. プラズマ中性化セルに必要なプラズマパラメータ

プラズマ中性化セル実験に必要なプラズマパラメータについて検討する。原研における中性化実験では、最大 400keV、1A の負イオンビームを生成できる負イオン加速試験装置 (NIAS) を使用する予定である。図 1 に水素プラズマに対する 100keV、400keV の水素負イオンビーム中性化効率を示す。横軸はプラズマ線密度である。中性化効率は参考文献[4]に準じて求めた。電離度 0% はガス中性化の場合である。100keV のイオンビームに対しては、 $5 \times 10^{15} \text{cm}^2$ 程度までの線密度の範囲で中性化効率の最大値が得られる。中性化効率最大値は電離度 0%、10% でそれぞれ 60%、67% 程度である。400keV では電離度の違いによる中性化効率の差がより明白になる。プラズマ線密度

$4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ において電離度 0、10%に対して中性化効率がそれぞれ 40%、55%となり、約 1.4 倍の差が見られる。よって電離度 10%のプラズマを適当な範囲の線密度を持って生成することができればガス中性化セルとの有意な比較を行うことが可能となる。そこで、本開発では 10%以上の電離度達成を目標と定めた。

3. プラズマ中性化セルの設計

3. 1 プラズマ源の形状

本研究で開発した大容量プラズマ源と大阪大学で製作された小型プラズマ源を図 2 に示す。大容量プラズマ源 (図 2(a)) は長さ 2000mm、直径 600mm の円筒形で、材質はステンレスである。容器の周りにはプラズマを閉じ込めるための永久磁石がおかれている。高さ 20mm、幅 10mm のネオジウムであり、これらを円筒表面とエンドプラグに 36 等配 (10 度間隔) で置き、カusp磁場を形成している。磁石の長さは円筒表面では 2000mm、エンドプラグでは 180mm である。エンドプラグの中心にはビームを通すためのポート(直径 200mm)を開けた。ポート付近のビームが通る領域における磁場を磁気クーロン法により計算した (図 3)。エンドプラグ上のポート中心を 0 点とし、半径方向を R、ビームライン方向を L で示す。R 方向ではポートの中心から半径 100mm の範囲で磁束密度を求めている。ビームライン上では磁束密度 1 Gauss 以下である。仮に 400keV の水素負イオンが通る場合、磁束密度 1 Gauss でのラーマ-半径は 900m であり、ビーム軌道はプラズマ中性化セルの磁場に大きな影響を受けないことがわかる。

小型プラズマ源を図 2(b)に示す。長さは約 1400mm、直径約 320mm の円筒形である。円筒表面には高さ 20mm、幅 6mm のネオジウム永久磁石が入った長さ約 1400mm の磁石を 16 本並べた。ビームを通すエンドプラグには磁石をおいていない。

プラズマ生成は、熱陰極であるヘアピン型のタングステンフィラメントと容器間に直流電圧を印加して行う直流アーク放電である。

3. 2 プラズマ生成に関する検討

プラズマ源の設計にあたり、プラズマ中性化セルとして必要なプラズマを得るために、解析的に多極磁場型のプラズマ生成に関して検討を行った[5,6]。

3. 2. 1 全イオン損失面積 S_L

全イオン損失面積 S_L は以下のように表すことができる。

$$S_L = S_A + S_F + K S_p$$

S_A は陽極面積、 S_F は陰極面積、 S_p はポートでのロス面積であり、 K はポート近傍でのプラズマ密度勾配に関する係数である。ここでは $K=0.5$ とする。 S_A は次式で表せる。

$$S_A = 2L_C (M_i v_i / eB)$$

L_C はカスプ長、 v_i はカスプに逃げるイオンの速度である。イオンが壁に衝突する速度 v_i をイオン音速とし、電子温度 5eV、カスプでの残留磁束密度が 1.1kG のとき、陽極面積は

$$S_A=1974\text{cm}^2$$

となる。陰極面積は長さ 180mm、 ϕ 1.2mm のフィラメント 12 本の場合、

$$S_F=81\text{cm}^2$$

となる。よって $S_P=628\text{cm}^2$ とすると、全イオン損失面積は

$$S_L=2369\text{cm}^2$$

となる。プラズマ体積は $V_P=449771\text{cm}^3$ とすると、プラズマ閉じ込めの目安となるイオン損失特性長 V_P/S_L は、

$$V_P/S_L=190\text{cm}$$

である。

小型プラズマ源の場合についても同様に解くと、陽極損失 S_A は 512cm^2 、陰極損失 S_F は 81cm^2 、エンドプラグでの損失 S_P は 1529cm^2 となり、全イオン損失面積は $S_L=1358\text{cm}^2$ である。プラズマ体積 V_P を 46725cm^3 とすると、イオン損失特性長 V_P/S_L は 34cm となる。

閉じ込め性能としては大容量プラズマ源が小型プラズマ源の 5.6 倍程高いと見積もられる。最適ガス圧が 0.3Pa である JT60 用負イオン NBI のプラズマ源では $V_P/S_L=63.4\text{cm}$ [7] であり、大容量プラズマ源は更に高い閉じ込め性能を有している。

3. 2. 2 電子の閉じ込め時間

電子の閉じ込め時間 τ_e は、

$$\tau_e=4V/v_eAa$$

と表せる。 V は放電容器の体積、 v_e は電子の初期エネルギーでここでは放電電圧と等しい 80V とし、 Aa はその電子の実効損失 S_A+KS_P である。これらを代入すると、 τ_e は $1.96 [\mu\text{s}]$ となる。小型プラズマ源の場合は $0.63 \mu\text{s}$ となり、電離に寄与する電子の寿命は 3 倍程度異なる。

3. 3 計算機シミュレーションによる閉じ込め評価

アーク放電を用いたイオン源プラズマ生成におけるガス原子、分子のイオン化の主なプロ

セスは、フィラメントから放出される熱電子との電離衝突によるものである。この熱電子の軌道を追跡し、バケット型イオン源装置の閉じ込め磁場を評価をする手法は小原らによって導入された[8]。更に衝突項を入れ電離衝突点でプラズマ生成を評価する方法が行われている[9,10]。本稿では、この電子軌道を追跡し、ガスとの衝突を考慮することによって電離衝突点分布、及び閉じ込め特性についての評価を行う。

3. 3. 1 電子軌道追跡シミュレーション

電子の運動方程式をルンゲ・クッタ・ギル法を用いて解くことにより、電子軌道を追跡するシミュレーションを行った。衝突計算は乱数を用いたモンテカルロ法により解く。ここでは簡単な評価を行うために単原子分子であるアルゴンガスを対象とし、電子とアルゴンとの電離、励起、弾性衝突を考慮する。陰極となるフィラメント周りにはほぼ放電電圧に等しい陰極降下部（シース領域）が形成され、その急峻な電位変化領域で熱電子はエネルギーを得る。よって電子の初期エネルギーは放電電圧と等しいものとし80eVを与え、電離、励起衝突時には電子はそれぞれ15.8、11.6eVのエネルギーを失うものとした。80eVの高速電子は、衝突によってエネルギーを失い、電離衝突エネルギー以下になった場合、または壁への衝突が起こるまで追跡される。

3. 3. 2 電子軌道と電離衝突点

大容量プラズマ源において、256個の電子（16本のフィラメントから16個ずつ追跡）を追跡した。図4に円筒断面と長手方向の透視図上での軌道を示す。電子軌道（図4(a)）では、軌道がチャンバー全体に広がっていることがわかる。図4(b)に電離衝突点分布を示す。衝突点もチャンバー全体に広がっている。永久磁石の磁場により、電子軌道、電離衝突点分布ともに壁近傍から約50mm程度離れた位置より内側で閉じ込められている様子がわかる。

3. 3. 3 高速電子の寿命評価

フィラメントから放出される高速電子の寿命の評価を行った。電子の寿命は、衝突によるエネルギーロスと壁への衝突による消滅で決まるため、寿命の長さでガス圧依存性とプラズマ閉じ込め性能を検討することができる。

図5に各ガス圧で求めた大容量プラズマ源と小型プラズマ源における電子の寿命を示す。ガス圧が高いと平均自由行程が短くなり、電子は頻繁に衝突を繰り返し寿命は短くなる。ガス圧が下がると平均自由行程は長くなるが、壁での消滅過程が増加する。大容量プラズマ源では、装置サイズが大きいこと、閉じ込め性能がよいことから、ガス圧の減少と共に電子の寿命は急激に長くなる。一方、小型プラズマ源においてガス圧を下げていくと、0.13Pa程度までわずかに寿命が改善するが、より低ガス圧では寿命は下がる。これは壁への衝突、特に磁石のないエンドプラグへのロスが増加したことに起因している。計算における壁へのロスの割合は、大容量プラズマ源において0.13Paで21%、0.04Paで57%であるのに対し小型プラズマ源では0.13Paで80%、0.04Paでは100%近い電子が壁への衝突で失われた。このことは閉じ込め性能の高い装置を用いると、低ガス圧でより効率よくプラズマ生成が行われることを示唆している。

4. 実験結果と考察

4. 1 実験装置

プラズマ生成実験は負イオン源テストスタンド(NITS)にて行った。図6に概要図を示す。NITSはビームラインに2200 Liter/sの排気容量を持つターボ分子ポンプ(TMP1,2,3)を3台もつ。この真空容器にゲートバルブを介して大容量プラズマ源を取り付けた。プラズマ源を真空容器と同じ接地電位に固定し、フィラメントは陰極としてマイナスの電位に保つ。フィラメント電源は8系統に分かれており、一系統から2本の線を並列に引き出すことにより最高16本のフィラメントを取り付けることができる。チャンバーが冷却構造を持たないため、外部からファンによる空冷を行った。チャンバーのガス圧はピラニー真空計とバラトロンで、真空系の真空度(Pvacと呼ぶ)は電離真空計で測定した。

4. 2 水素によるプラズマ生成の検討と閉じ込め性能比較

4. 2. 1 放電特性

大容量プラズマ源及び小型プラズマ源の比較を行った。放電特性を比較するためにフィラメントは12本(Φ1.2mm、長さ90mmのヘアピン型)とした。フィラメント電圧を9から12Vまで変えたときのアーク電流—電圧特性を図7(a)、(b)にそれぞれ示す。アーク放電の特性曲線では、最初アーク電圧の増加と共にアーク電流が急激に増加し(空間電化制限領域)、ある電圧以上から電流の増加は抑えられる(温度制限領域)。小型プラズマ源の放電特性はこの特性をよく表している。一方、大容量プラズマ源ではアーク電圧をあげてもアーク電流の上昇が抑えられる高インピーダンスモードとなっており、特にフィラメント電圧を十分に加熱しても高い放電インピーダンスを示した。これはフィラメントからの電子電流が足りないため、強制的に高い電圧を掛けて放電電流を維持しようとするために起こると考えられる。

そこで大容量プラズマ源において、16本のフィラメントを用いてアーク電流—電圧特性を調べた(図8)。フィラメントを12本用いたとき、フィラメント電圧12Vにおいて、アーク電圧100Vでアーク電流は185Aであり、16本のフィラメントを用いたとき、は300Aとなった。放電電流は約1.6倍の増加となり、フィラメント電圧を上げてフィラメントを十分加熱し、電子電流を増やすと正常なアーク放電に近づいていくことがわかる。大容量プラズマ源において、入射パワーに対して放電電流を効率よく増加させるためには、フィラメント数を増やし電子電流を増加させることが必要であることが分かった。

4. 2. 2 イオン飽和電流密度

アークパワーを10kW、ガス圧を0.043Paとし、大容量プラズマ源においてイオン飽和電流(J_{is})の測定を行った。測定には水冷式の単針ランギュミュアプローブを用いており、プローブには-60Vの電圧を印加した。

図9に径方向の J_{is} 分布を示す。測定位置は図2に示されているポート3(P3)である。 J_{is} 分布は500mmの領域に渡ってほぼ一様で、壁から50mm程度離れた位置から急激に減少している。

長手方向（ビームライン方向）の J_{is} を図 10 に示す。図 2 の 4 箇所（P1、P2、P3、P4）において径方向中心位置で測定した結果、広い領域で J_{is} はほぼ一様となっていることを確認した。

4. 2. 3 閉じ込め性能評価

大容量プラズマ源と小型プラズマ源という閉じ込め性能の異なる二つの装置を用いて、プラズマパラメータを比較した。フィラメントは 12 本、アークパワーを 10kW としている。プローブ測定は、大容量プラズマ源ではポート P3 において径方向の中心で、小型プラズマ源では長手方向の中心からプローブを入れて装置中心にて行った。ガス圧を変えたときの電子温度と電子密度をそれぞれ図 11、12 に示す。

小型プラズマ源の電子温度は大容量プラズマ源に比べ常に高くなっている。電子密度を見てみると、大容量プラズマ源のガス圧に対する電子密度変化は、0.26Pa を境に傾向が異なっている。0.26Pa 以下ではガス圧の上昇と共に電子密度が増加し、0.26Pa 以上のガス圧ではほとんど変化しない。この理由は電離衝突断面積より説明できる。電離衝突に寄与するフィラメントからの高速電子と水素ガスとの電離衝突断面積は電子のエネルギーが 80eV でおおよそ $7 \times 10^{-17} \text{cm}^{-2}$ である。このとき平均自由行程がチャンバーの長さ程度になるガス圧は 0.26Pa である。0.26Pa 以下では電子の消滅は壁へのロスによるものが多く、それ以上ではガスとの衝突が顕著になる。一方、小型プラズマ源はエンドプラグに閉じ込め磁場がなく閉じ込め性能が低いため、計算機シミュレーションで示したように常に壁への衝突による消滅過程が顕著である。ガス圧を増やすほど壁へロスする前にプラズマ生成に電子のエネルギーが使われるため、ガス圧の上昇と共に密度があがる。

図 13 に電離度を示す。小型プラズマ源では電離度は大きく変化せず 0.02Pa において 1.2% 程度である。大容量プラズマ源では、低ガス圧においても電子密度が比較的高いため、急激に電離度が上昇する。これは軌道追跡で求めた閉じ込め性能を評価するガス圧と電子の寿命の関係と同じような傾向を示す。ここで 0.02Pa という低ガス圧において 10kW パワーで 4% の電離度を得た。これらの結果により、閉じ込め性能の高いプラズマ源ではより低いガス圧で電離度の高いプラズマが得られることがわかった。

4. 2. 4 アークパワー依存性

アークパワーを増やすことにより更に高電離プラズマの生成を目指した。しかし P_{vac} で測ったガス圧が放電開始から減少していることを確認した。これはポンピング現象による実効ガス圧の低下である。アーク放電によって解離した水素分子が壁に吸着し（ガスのポンピング）、その分実効ガス圧が減少する。容器の体積が大きいほど吸着面積が増大することから、ポンピングが著しくなる。図 14 にアーク電流、電圧波形を示す。アーク電流が放電開始直後に急激に減少している。本装置の容量が大きく、実効ガス圧が極度に減少するためである。アーク放電開始直後のピークのパワーと、アーク電流値が下がったところのパワーを比較すると (a)8kW が 2.5kW に (b)18.4kW が 6.4kW になる。電離度のパワー依存性を評価するためには、正確な実効ガス圧を得なければならない。そのためにガス圧が定常になるまで連続放電を行うにはチャンバーを水冷すること、またはポンピング現象を防ぐことが必要である。

4. 3 アルゴンプラズマ生成実験による高電離化

ITER を含めた次期核融合装置において、プラズマ中性化セルに用いるガスはビームと同種のガス、或いはアルゴン、キセノン等が候補としてあげられる。ここで、更に高電離を目指してアルゴンガスによるプラズマ生成実験を行った。またアルゴンは、水素のように解離分子が存在せず実効的なガス圧の減少を抑制できるため、電離度を正確に評価することができる。大きなアークパワーを入れるためにΦ1.5mm のフィラメントを 16 本用いた。図 15 にアークパワーと電子密度の関係を示す。アークパワーは 10、20、30kW、ガス圧はそれぞれ 0.027、0.051、0.086Pa としている。アークパワーの増加に伴い電子密度は増加している。0.086Pa、30kW で電子密度 $2.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ を得た。

図 16 にプラズマ線密度と電離度を示す。図 10 で示したようにビームライン方向にほぼ一様にプラズマが生成されているので、プラズマ線密度を求める場合、有効なプラズマの長さを 2000mm とした。0.027Pa において最高 17% の電離度を得た。またガス圧とアークパワーを調節することにより $4.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の領域まで 10% の電離度を得た。これにより有意なプラズマ中性化セル実験を行う見通しを得た。

5. まとめ

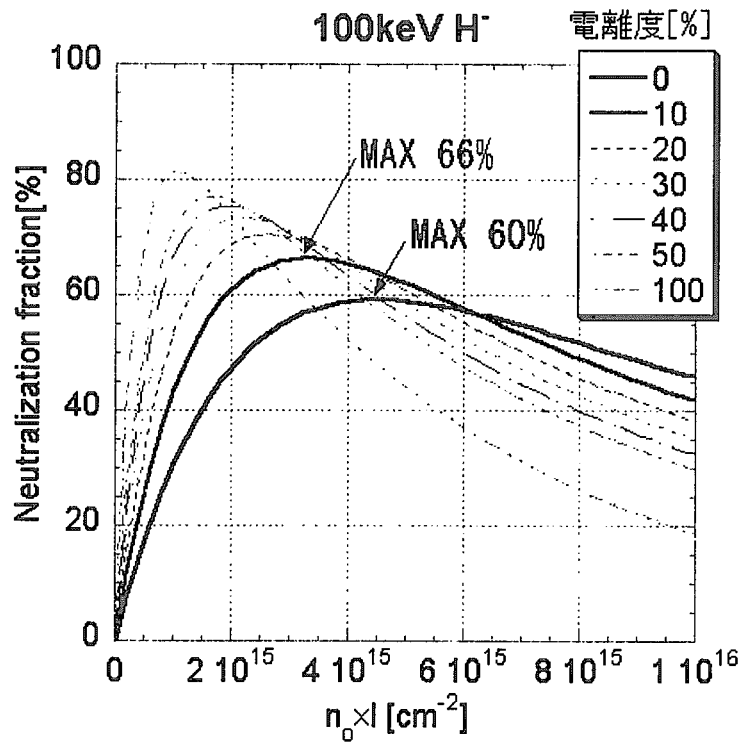
- (1) 大容量のプラズマ源を用いて長さ 2000mm に渡って一様なプラズマを生成した。
- (2) プラズマ閉じ込め特性の異なる二つのプラズマ源を用いて比較し、閉じ込め性能が低くエンドプラグに閉じ込め磁石のない小型プラズマ源ではプラズマの壁へのロスが大きいことがわかった。また大容量プラズマ源においても、平均自由行程がプラズマ源の全長より長くなると電子密度が下がることがわかった。閉じ込め磁場が強く、装置サイズが大きい装置がプラズマ閉じ込め性能の高いことをシミュレーション、及び実験において示した。
- (3) 大容量プラズマ源では、運転ガス圧を十分に低減することができ、0.02Pa という低ガス圧、アークパワー 10kW において電離度 4% の水素プラズマを生成した。
- (4) アルゴンプラズマ生成実験において、アークパワーと共にプラズマ密度が増加することがわかり、0.027Pa、30kW で電離度 17% を得た。また、負イオンビームの中性化実験を行うために必要な 10% の電離度のプラズマをプラズマ線密度 $4.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の範囲で得ることができた。
- (5) これにより 400keV まで負イオンビームを加速できる NIAS にて、プラズマ中性化セルの実証実験を行う見通しを得た。

謝辞

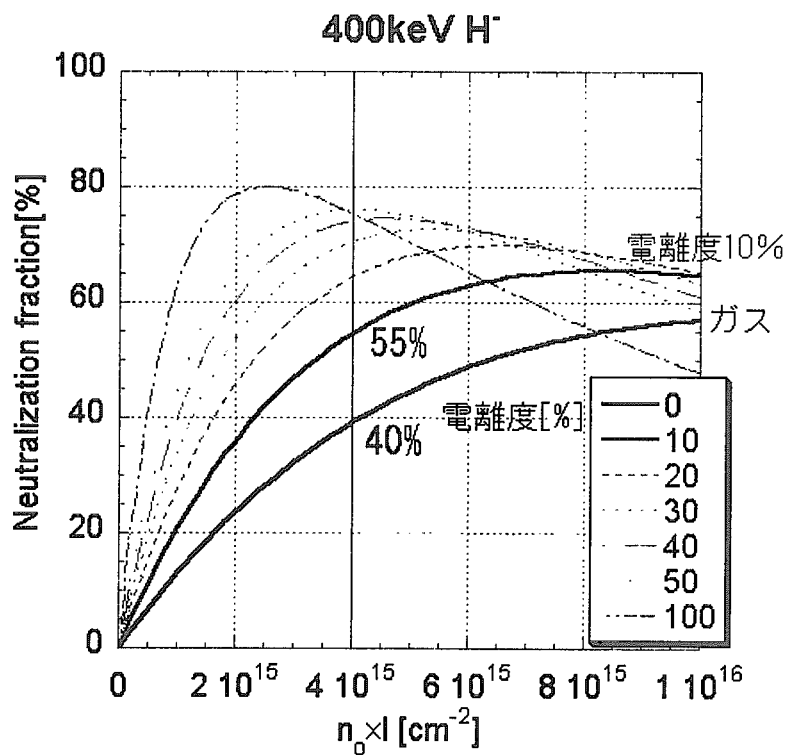
本実験において、装置の運転・保守にご協力いただいた原子力エンジニアリング（株）の阿部宏幸氏に深く感謝いたします。また研究一連にあたり、有意義な議論やご助言を頂いた NBI 加熱研究室のみなさまに感謝いたします。また研究を遂行するにあたり、不断の激励と支援を頂きました関昌弘核融合工学部長、松田慎三郎那珂研究所所長に深く感謝致します。

参考文献

1. M. Kuriyama et al.; J. Nuclear Science and Tech. 35(11), 739(1998).
2. K. Watanabe et al.; Rev. Sci. Instrum. 71, 2, 1231(2000).
3. 奥村義和;核融合研究第60卷第5号11(1988).
4. 堀池寛; JAERI-M, 86-064.
5. Y. Arakawa et al.; JAERI-M 8741(1980).
6. N.Miyamoto et al.;JAERI-Tech 99-010(1999).
7. JAERI-M 94-072(1994).
8. Y. Ohara et al.; J. Appl. Phys. 61(4) 1323(1987).
9. S. Ido, H. Hasebe, and Y.Fujita; Jpn. J. Appl. Phys. 32(1) 4761 (1993).
10. S. Ido and H. Hasebe; Jpn. J. Appl. Phys. 33(2) L380 (1994).



(a)



(b)

図1：各電離度に対するプラズマ線密度と中性化効率
負イオンビームのエネルギーは(a)100keV、(b)400keV。

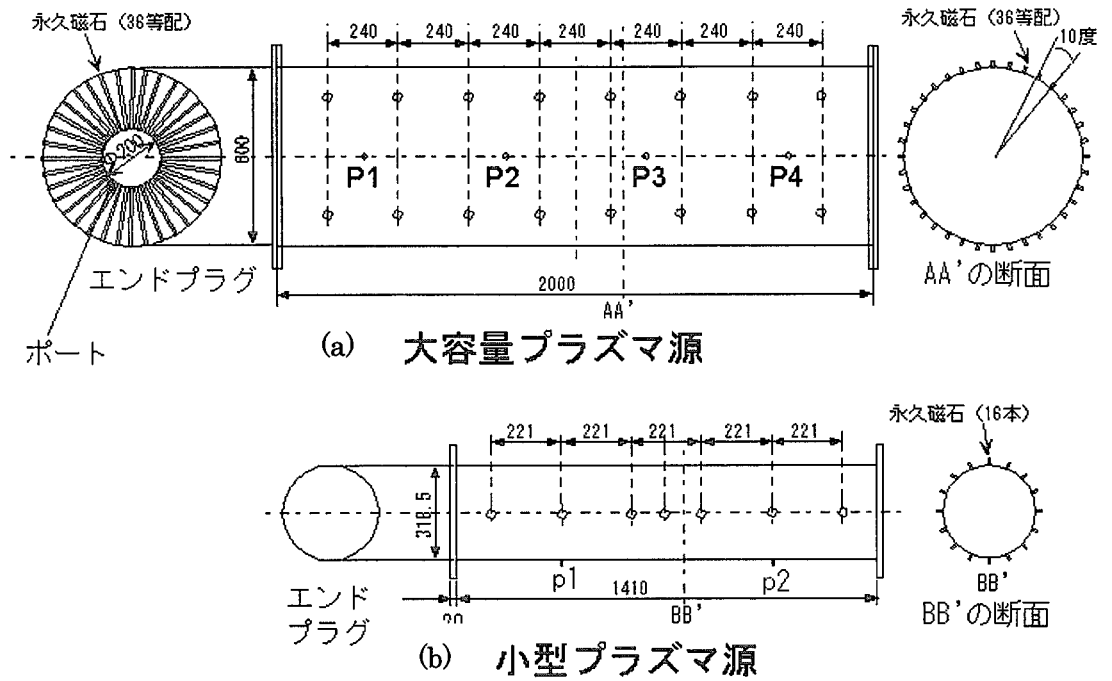
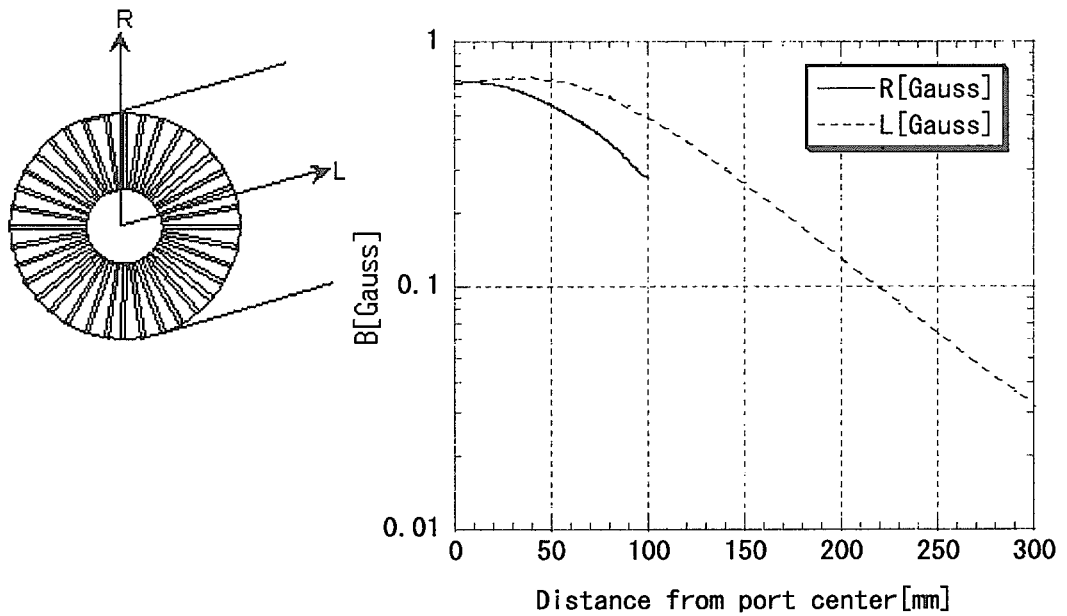


図 2 : 大容量プラズマ源と小型プラズマ源



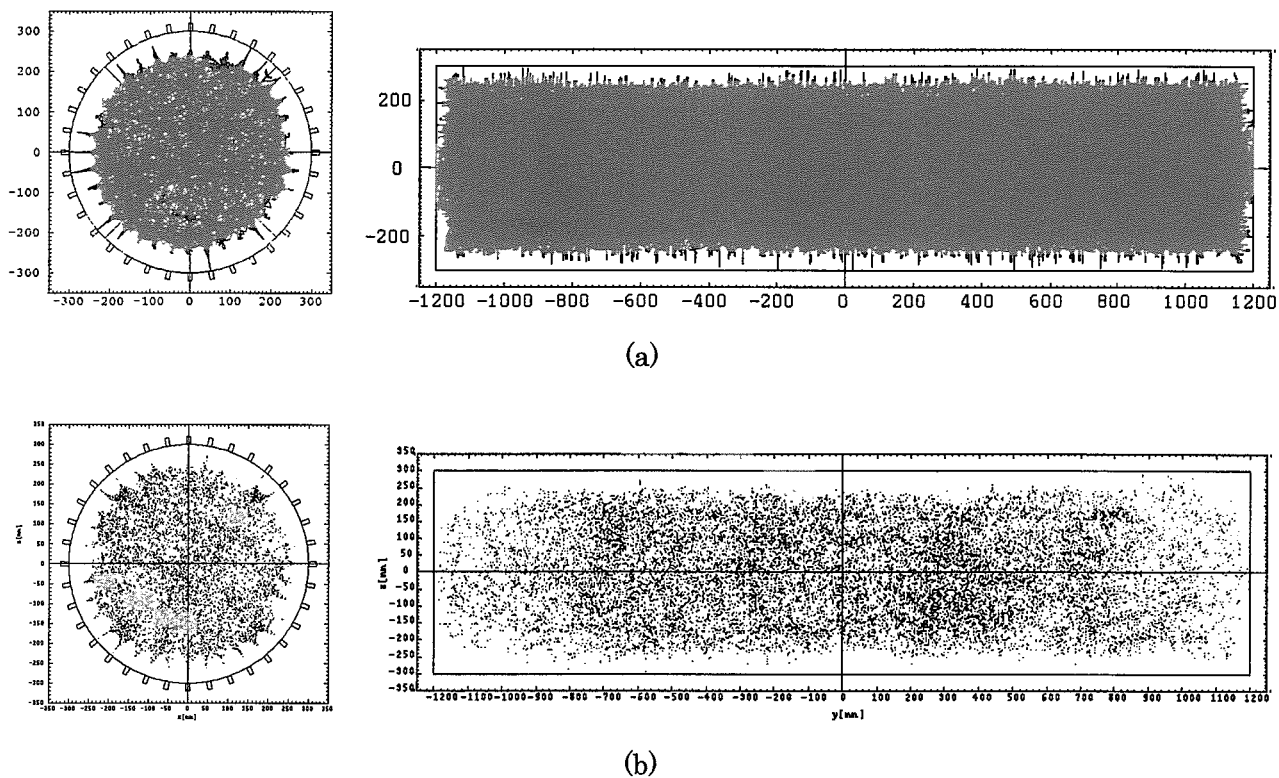


図 4 : 電子軌道(a)と電離衝突点分布(b)

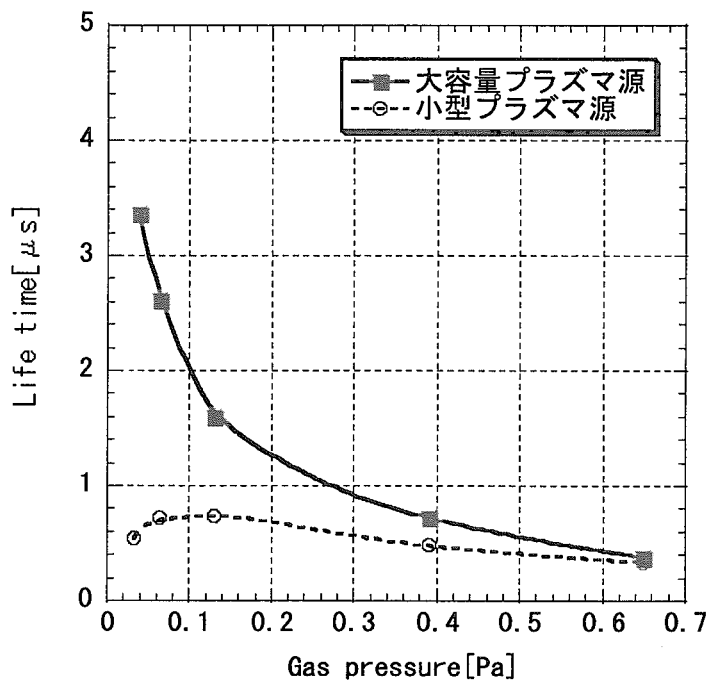


図 5 : 各ガス圧に対する電子の寿命

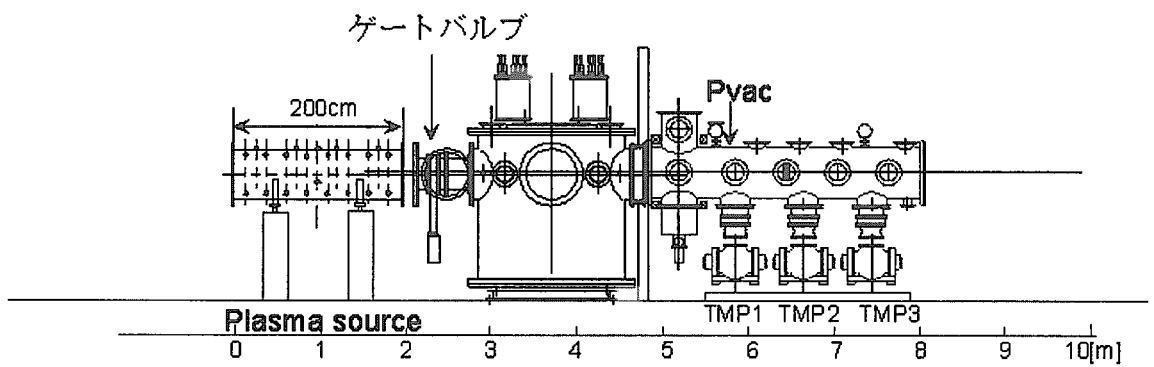


図 6 : NITS における実験形態

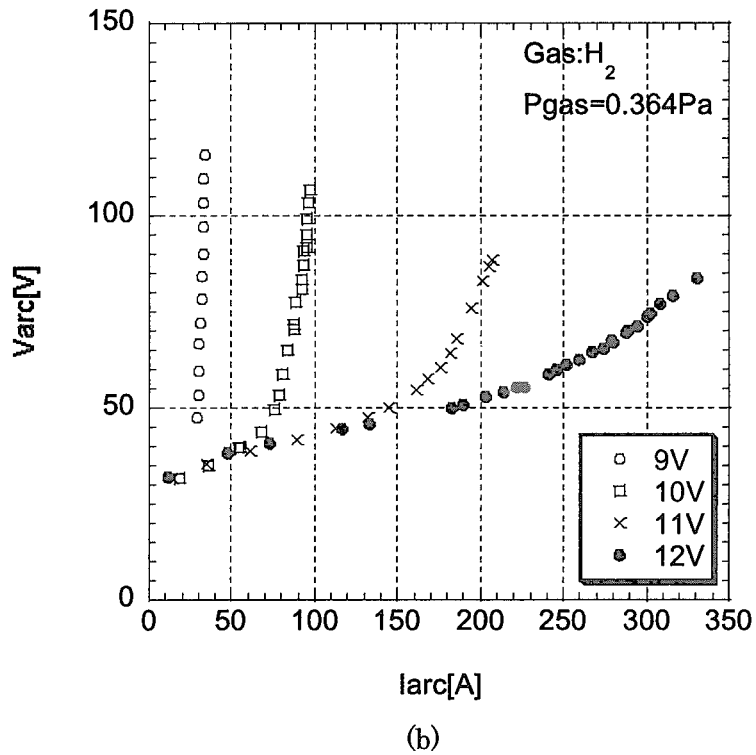
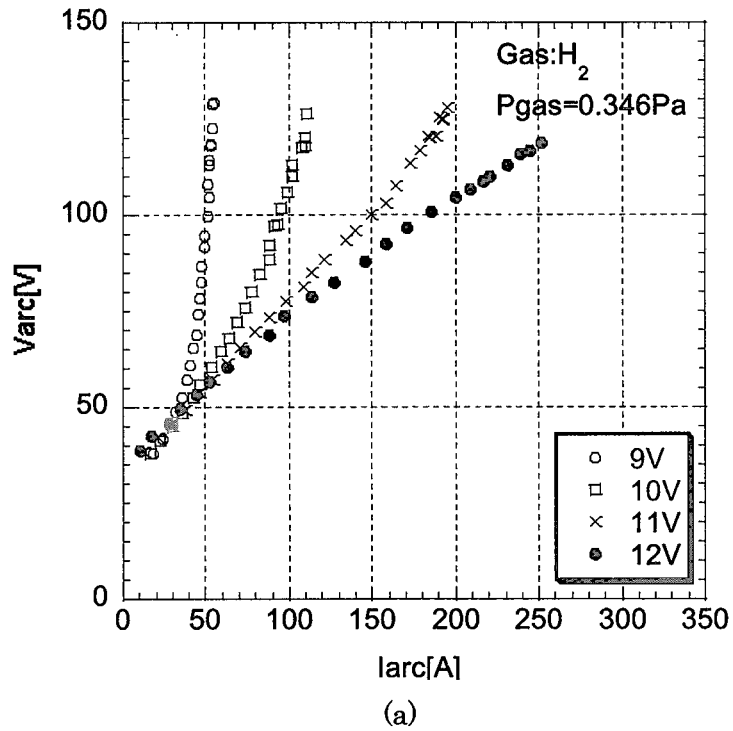


図7：アーク電流—電圧特性

(a) 大容量プラズマ源、(b)小型プラズマ源
フィラメント 12 本。

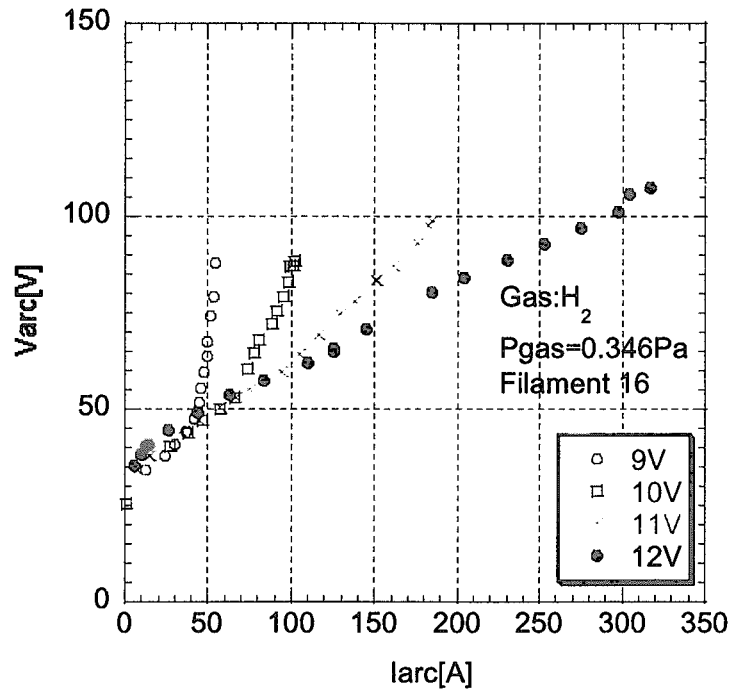


図 8 : アーク電流—電圧特性
 大容量プラズマ源でフィラメント 16 本。

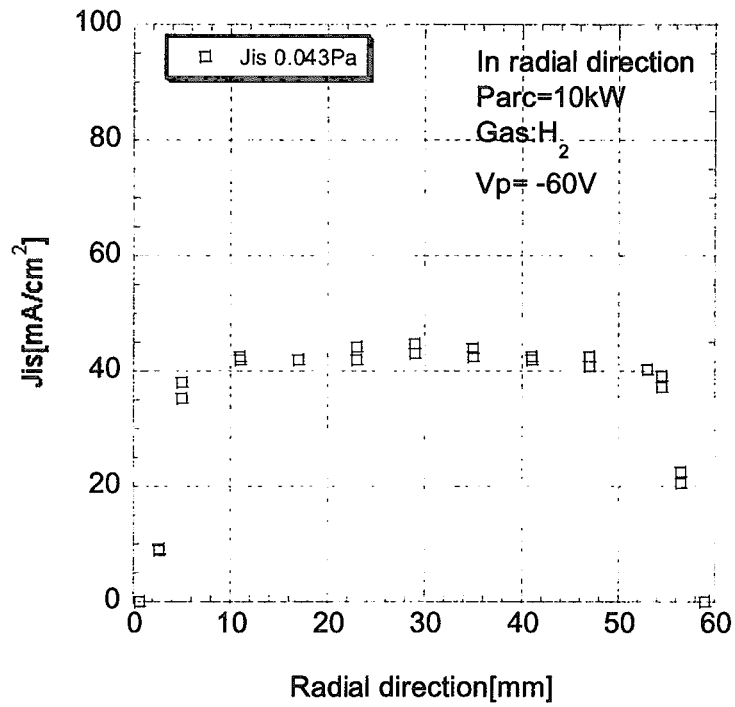


図 9 : 径方向のイオン飽和電流

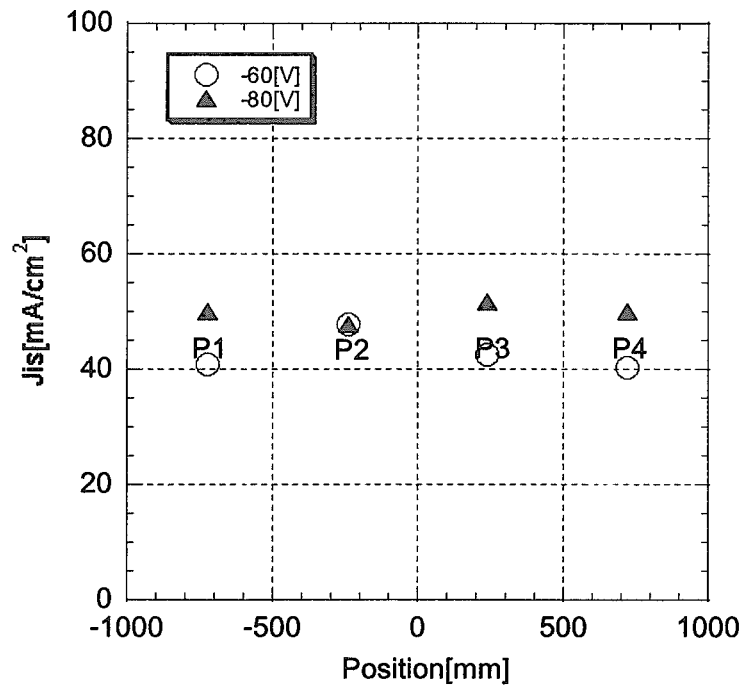


図 10 : 長手方向のイオン飽和電流

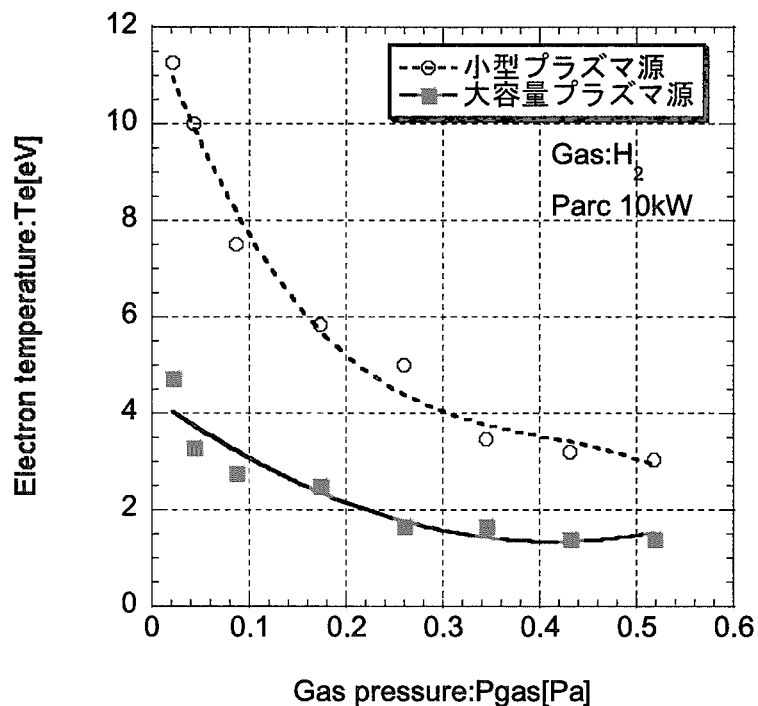


図 1 1 : 水素プラズマにおける電子温度

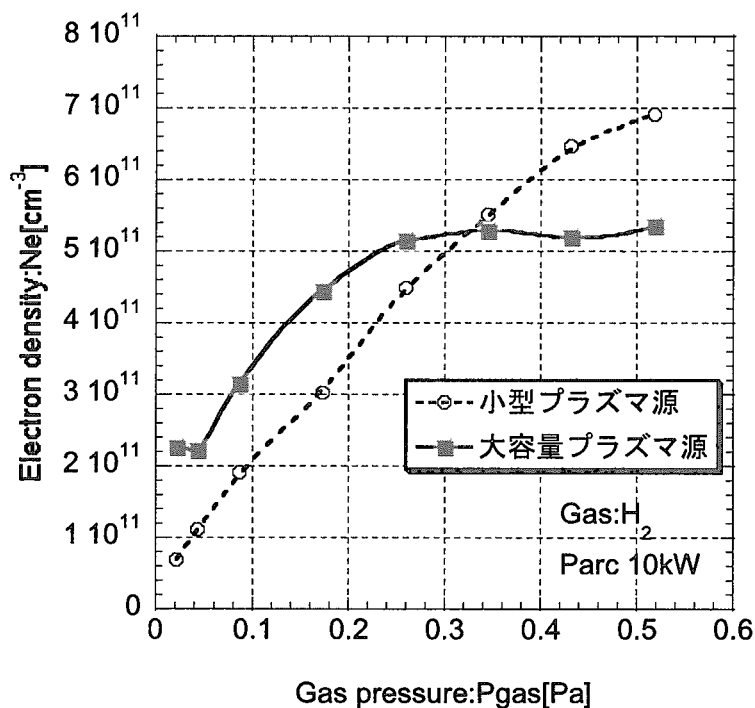


図 1 2 : 水素プラズマにおける電子密度

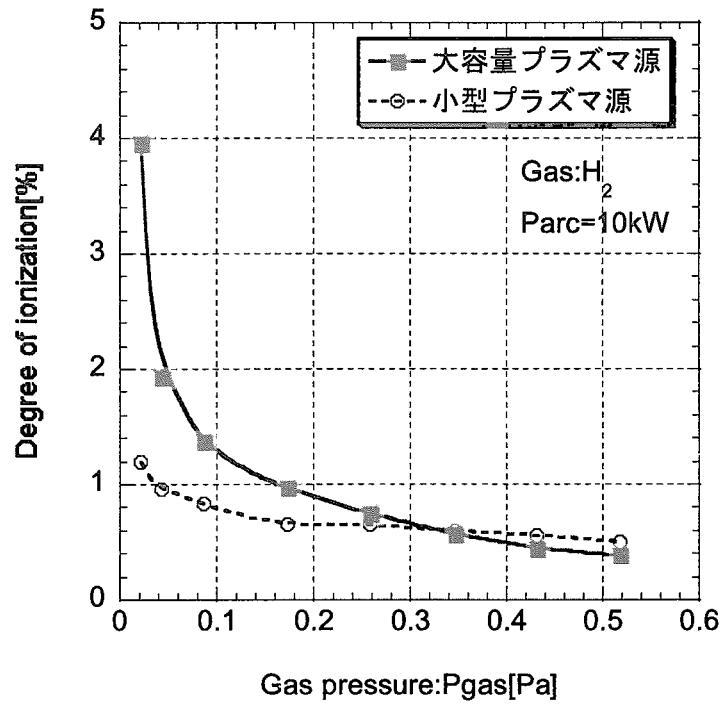
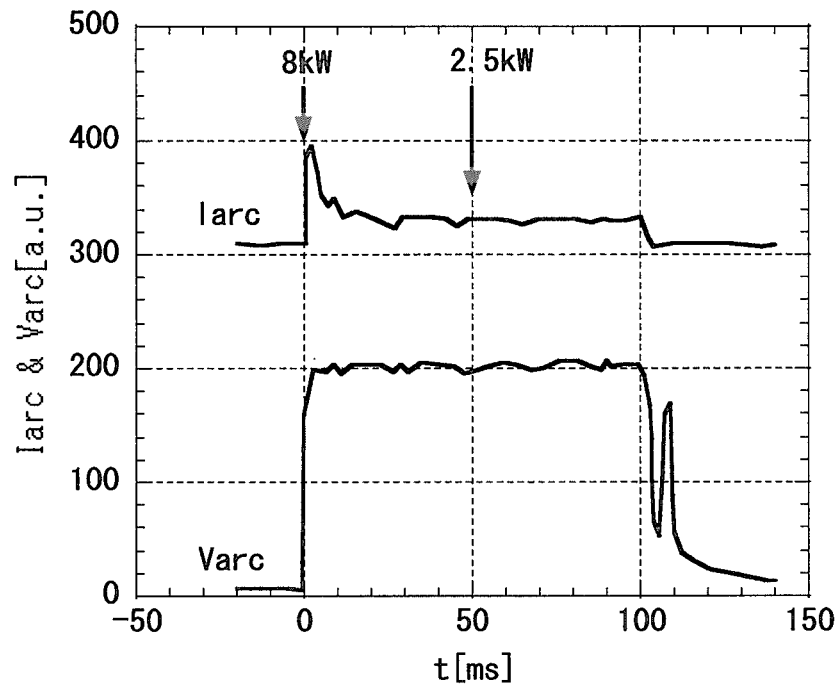
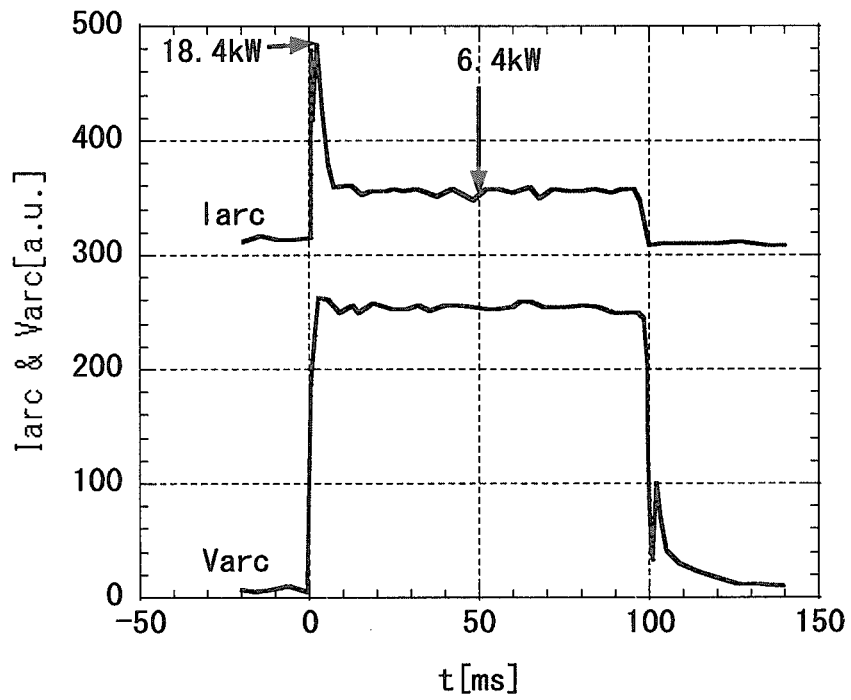


図 1 3 : 水素プラズマにおける電離度



(a)



(b)

図 1 4 : アーク電流(I_{arc})、電圧波形(V_{arc})

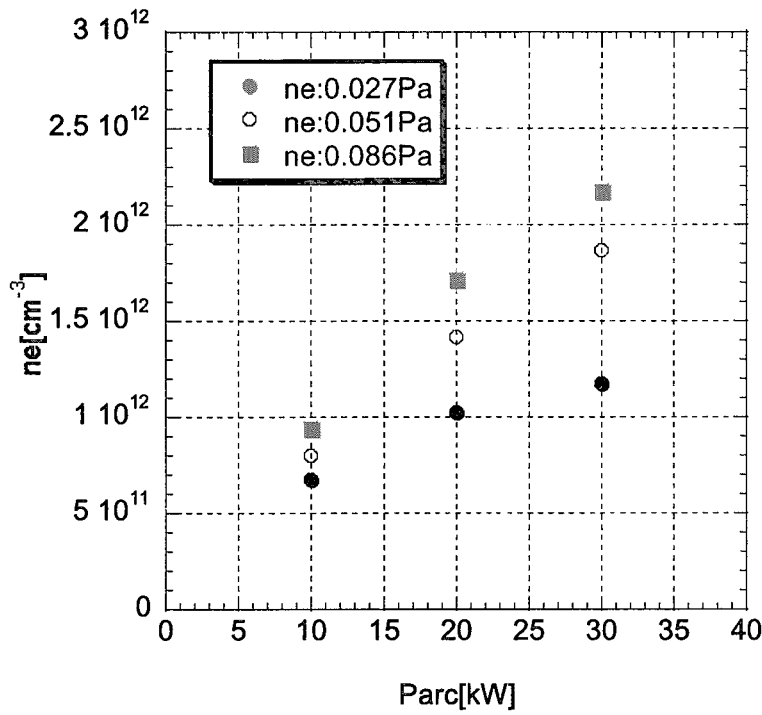


図 15 : アルゴンプラズマでのパワー依存性

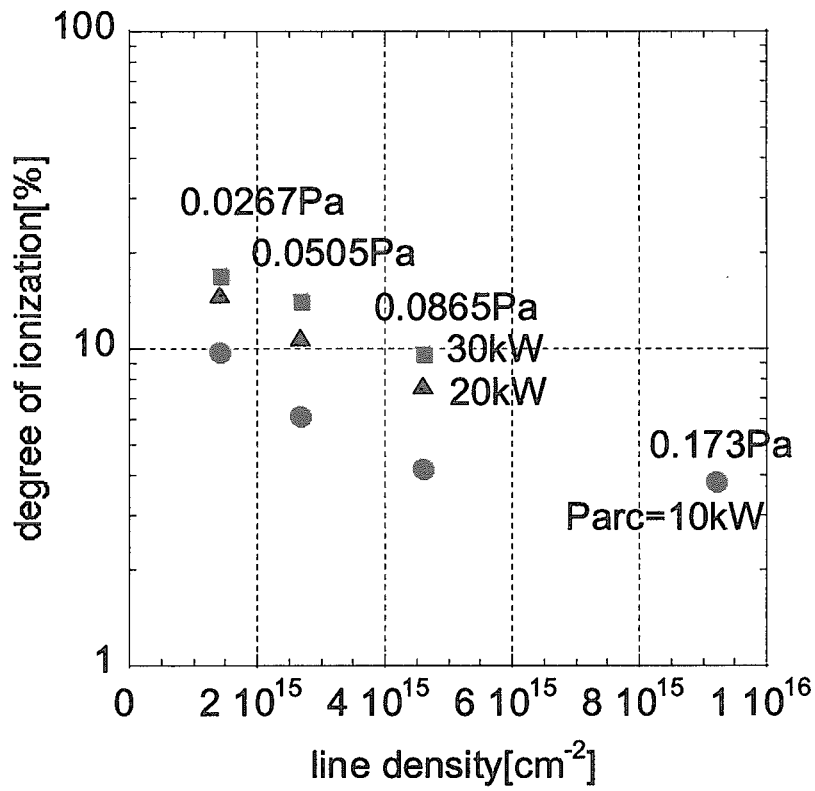


図 16 : アルゴンプラズマでの電離度

This is a blank page.

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

$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

表5 SI接頭語

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

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^{-1}
力	ニュートン	N	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N / m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	J / s
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
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	S	A / V
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁束密度	テスラ	T	Wb / m^2
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	$^{\circ}\text{C}$	
光強度	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
照射線量	ルクス	lx	lm / m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J / kg
線量当量	シーベルト	Sv	J / kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オンゲストローム	\AA
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

$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$
 $1 \text{ b} = 100 \text{ fm} = 10^{-28} \text{ m}^2$
 $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$
 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$
 $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$
 $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

(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, ヘクト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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s (=1 N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	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 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

