

JAERI-M
92-156

RFプラズマ源における高密度プラズマ生成実験

1992年10月

鈴木 靖生・花田磨砂也・奥村 義和・田中 政信

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。

入手の間合わせは、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）にて、お申し込みください。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）で複写による実費領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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

RFプラズマ源における高密度プラズマ生成実験

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部
鈴木 靖生・花田磨砂也⁺・奥村 義和⁺・田中 政信⁺

(1992年9月24日受理)

高周波プラズマ源において高密度プラズマを生成した。プラズマ源は内径200mm、深さ270mmの円筒形であり、1～3ターンの銅製のアンテナが据え付けられている。プラズマ源に周波数2MHz、20kWの高周波のパワーを入力することにより、プラズマ源内水素ガス圧0.6Paにおいてイオン飽和電流密度120mA/cm²、密度 6.0×10^{11} cm⁻³のプラズマを得た。また、イオン飽和電流密度はプラズマ源内中心100mmの範囲内で一様であった。さらにアンテナの最適化を行い、アンテナ表面に絶縁被覆を施すことにより高密度なプラズマを生成できることを実証した。

High Density Plasma Production
in a Multicusp Plasma Generator with RF Antenna

Yasuo SUZUKI, Masaya HANADA⁺
Yoshikazu OKUMURA⁺ and Masanobu TANAKA⁺

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

(Received September 24, 1992)

A high density plasma was produced by radio-frequency in a multicusp plasma generator. The generator is a cylindrical chamber of 200 mm in inner diameter and 270 mm in length with 1-3 turn copper tube antenna. By injecting a 2 MHz, 20 kW RF into the multicusp plasma generator, hydrogen plasma of an ion saturation current density of 120 mA/cm² and a hydrogen plasma of a density of 6.0×10^{11} cm⁻³ was produced at a pressure of 0.6 Pa in the generator. The ion saturation current density was uniform over the central area of 100 mm in diameter. Coating the antenna with an insulator, we proved that the efficiency of the plasma production was improved.

Keywords: Radio-frequency, Multicusp Plasma Generator, Antenna,
Hydrogen Plasma

⁺ Department of Fusion Engineering Research

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置と方法	1
2.1 RFプラズマ源	1
2.2 高周波電源システム構成	2
2.3 実験方法	3
3. 実験結果と考察	3
3.1 イオン飽和電流密度	3
3.2 電子温度	3
3.3 運転ガス圧	3
3.4 イオン飽和電流密度分布	4
3.5 高周波パワーの反射率	4
3.6 整合回路の静電容量	4
3.7 アンテナの絶縁被覆	5
3.8 熱負荷測定	5
4. ま と め	5
謝 辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Setup and Procedure	1
2.1 RF Plasma Generator	1
2.2 RF Generator	2
2.3 Experimental Procedure	3
3. Experimental Results and Discussion	3
3.1 Ion Saturation Current Density	3
3.2 Electron Temperature	3
3.3 Operating Gas Pressure	3
3.4 Distribution of the Ion Saturation Current Density	4
3.5 Ratio of Reflected RF Power	4
3.6 Capacitance of a Matching Circuit	4
3.7 Coating Antenna	5
3.8 Measurement of Heat Loading	5
4. Summary	5
Acknowledgment	6
References	6

1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (ITER) の加熱及び電流駆動に有望視されている大出力中性粒子入射装置 (NBI) を実現するためには大出力長パルスの負イオン源が必要である。現在設計が進められている ITER 用 NBI の負イオン源に要求される性能は、ビームエネルギー 1.3 MeV、ビーム電流 (電流密度) 16.5 A (22 mA/cm²)、パルス幅は 2 週間、ビーム発散角は 5 mrad である¹⁾。この NBI には 2 週間にも及ぶ長パルス入射が計画されており、大出力で長パルスの負イオン源の開発が望まれている。原研では既に長パルス負イオン源においてセシウム混入状態で 50 keV、0.25 A、24 時間のビームを引き出すことに成功している²⁾。しかし、フィラメントの寿命、セシウム混入運転でのフィラメント材であるタングステンの汚染による H⁻イオン密度低下の問題により 2 週間にも及ぶ長パルスビーム生成にはいくつかの壁が生じる。高周波 (RF) を用いた RF プラズマ源は消耗部が少ないため寿命が極めて長いと考えられる。フィラメント材等の蒸散が無いいためプラズマ電極上に清浄なセシウム層を維持できる可能性が大きい。また、このプラズマ源は負イオン NBI システムのプラズマ中性化セルとしての応用も考えられる。プラズマ中性化セルは高周波放電等により高密度多荷 Xe プラズマを生成し、負イオンビームをプラズマとの衝突により中性化するものである。そこで最大 30 kW の出力を持つ高周波電源を用いて、プラズマ源内にアンテナを挿入して高周波誘導する RF プラズマ源の開発を目的に基礎実験を行った。

2. 実験装置と方法

2.1 RF プラズマ源

実験は小型真空容器に RF プラズマ源を取付けて行った。図 2.1 に RF プラズマ源模式図を示す。また、写真 2.1 に実験装置を示し、写真 2.2 に上蓋に取り付けた 3 ターンアンテナを示す。プラズマ源は内径 200 mm、深さ 270 mm の円筒型である。その周りには 10 極の SmCo マグネットのラインカスプが、また上蓋及び真空容器との境界に据え付けられた下蓋にはそれぞれ 4 極のラインカスプが構成され、円筒多極磁場型放電容器となっている。上蓋に 14 mm φ のアンテナ用導入ポートを取付け、アンテナが取り外し自在な構造になっている。導入ポートに挿入する導入端子は、フィラメント電流導入端子を改良して製作し、銅パイプを曲げて自作したアンテナと銀ロウ付けした。銅パイプ内には、導入端子を介して冷却水を流した。また、プラズマ源側壁には放電起動用の 1.2 mm φ の W フィラメント及び内部観察用のガラス窓が取り付けられている。プラズマ密度を測定するためのラングミュアプローブはプラズマ源の径方向と軸方向が測定できるように 2 本取り付けられている。

以下に RF アンテナの諸元を示す。

1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (ITER) の加熱及び電流駆動に有望視されている大出力中性粒子入射装置 (NBI) を実現するためには大出力長パルスの負イオン源が必要である。現在設計が進められている ITER 用 NBI の負イオン源に要求される性能は、ビームエネルギー 1.3 MeV、ビーム電流 (電流密度) 16.5 A (22 mA/cm²)、パルス幅は 2 週間、ビーム発散角は 5 mrad である¹⁾。この NBI には 2 週間にも及ぶ長パルス入射が計画されており、大出力で長パルスの負イオン源の開発が望まれている。原研では既に長パルス負イオン源においてセシウム混入状態で 50 keV、0.25 A、24 時間のビームを引き出すことに成功している²⁾。しかし、フィラメントの寿命、セシウム混入運転でのフィラメント材であるタングステンの汚染による H⁻イオン密度低下の問題により 2 週間にも及ぶ長パルスビーム生成にはいくつかの壁が生じる。高周波 (RF) を用いた RF プラズマ源は消耗部が少ないため寿命が極めて長いと考えられる。フィラメント材等の蒸散が無いいためプラズマ電極上に清浄なセシウム層を維持できる可能性が大きい。また、このプラズマ源は負イオン NBI システムのプラズマ中性化セルとしての応用も考えられる。プラズマ中性化セルは高周波放電等により高密度多荷 Xe プラズマを生成し、負イオンビームをプラズマとの衝突により中性化するものである。そこで最大 30 kW の出力を持つ高周波電源を用いて、プラズマ源内にアンテナを挿入して高周波誘導する RF プラズマ源の開発を目的に基礎実験を行った。

2. 実験装置と方法

2.1 RF プラズマ源

実験は小型真空容器に RF プラズマ源を取付けて行った。図 2.1 に RF プラズマ源模式図を示す。また、写真 2.1 に実験装置を示し、写真 2.2 に上蓋に取り付けた 3 ターンアンテナを示す。プラズマ源は内径 200 mm、深さ 270 mm の円筒型である。その周りには 10 極の SmCo マグネットのラインカスプが、また上蓋及び真空容器との境界に据え付けられた下蓋にはそれぞれ 4 極のラインカスプが構成され、円筒多極磁場型放電容器となっている。上蓋に 14 mm φ のアンテナ用導入ポートを取付け、アンテナが取り外し自在な構造になっている。導入ポートに挿入する導入端子は、フィラメント電流導入端子を改良して製作し、銅パイプを曲げて自作したアンテナと銀ロウ付けした。銅パイプ内には、導入端子を介して冷却水を流した。また、プラズマ源側壁には放電起動用の 1.2 mm φ の W フィラメント及び内部観察用のガラス窓が取り付けられている。プラズマ密度を測定するためのラングミュアプローブはプラズマ源の径方向と軸方向が測定できるように 2 本取り付けられている。

以下に RF アンテナの諸元を示す。

銅パイプ製	OD = 6 mm, ID = 5.8 mm
水冷式	流量 4.5 l/min
アンテナ巻径	100 mm
ターン数	1, 2, 3 ターン
絶縁被覆	初期実験では被覆無し 後期実験ではセラミックボンドにて被覆 2 ターンアンテナ…アロンセラミック D 1 ターンアンテナ…セラミックボンド 5 5 2

2.2 高周波電源システム構成

高周波電源のシステム構成を図2.2に示す。本高周波電源は標準信号発生器と広帯域アンプにより高周波信号を最大500Wまで増幅させる。終段増幅部は真空管により構成されており広帯域アンプの出力を最大30kWまで増幅し負荷へ出力することができる。終段増幅部と図2.3に示す整合器は高周波同軸ケーブル (RG-19/U) にて接続されており、真空可変コンデンサとコイルにより組まれた回路でインピーダンスを調整することが出来る。通常はコイルのインダクタンスを固定し、真空可変コンデンサ (VVC-1, VVC-2) を遠隔操作で動作させることにより静電容量を調整する。整合器からの高周波出力はプラズマ源内のアンテナに供給される。終段増幅部からの高周波出力パワー (P_{PWD}) 及び反射パワー (P_{REF}) の計測は終段増幅部出口に取り付けられた方向性結合器によって行った。方向性結合器の出力はオシロスコープを使って、50Ω終端で測定した。実際にプラズマ源に入力されたパワー (P_{NET}) は P_{PWD} と P_{REF} の差より算出した。反射パワーはダミーロード (1 kW) に吸収されるが、これを越える場合、電源回路及び真空管に吸収されるのであまり好ましくない。極力反射が小さくなる方向に整合をとる必要がある。

以下に高周波電源の諸元を示す。

高周波発振方式	他励式
	初段増幅部出力 最大500W
周波数	2~10 MHz
高周波出力	パルス 30 kW 連続 10 kW
整合器	真空可変コンデンサ VVC-1 型式 CV1C-2300M 2300 pF、15 kV VVC-2 型式 CV2C-1000E 1000 pF、35 kV コイル 13ターン、12.9 μH (全16ターン、17.1 μH)

2.3 実験方法

周波数は2 MHzを選んだ。これは数MHz以下のRF周波数帯域では、磁気との結合が弱くプラズマ分布が均一になり易いと考えられ、また、この周波数帯域は発振器を真空管で製作できるため大出力の高周波電源を容易に入手できることである。また、LBL³⁾、Culham 研究所⁴⁾も2 MHzを使用しており、同じ周波数で効率を比較することができる。

本実験ではアンテナのターン数及び絶縁被覆の有無等によるRFプラズマ源の特性を調べた。特性の評価は、ラングミュアプローブを用いたイオン飽和電流密度及び電子温度の測定、冷却水温差によるプラズマ源及びアンテナの熱負荷測定等により行った。

3. 実験結果と考察

3.1 イオン飽和電流密度

アンテナが1、2、3ターンでのイオン飽和電流密度のRFパワー存在性を図3.1に示す。イオン飽和電流密度 (J_{is}) はRFパワーに比例して線形に増加し、 P_{NET} が20kWにおいて120mA/cm²に達する。またアンテナのターン数が大きくなるほど増加直線の傾きは大きくなる。これは、ターン数を増やすとプラズマとの結合性が大きくなり効率良くRFパワーを入射することができるからであると考えられる。しかし、アーク放電と比較したとき J_{is} は約1/3でありパワー効率はかなり低い結果となっている。原因はいくつかあると推定されるが、一つの原因としてプラズマ中でのアンテナのロス面積が考えられる。図3.2にアンテナ挿入状態でアーク放電を点火しプラズマ源の軸方向にプローブをスキャンしたときの J_{is} の分布図を示すがアンテナ近傍で J_{is} が極端に低下していることがわかる。しかし、アーク放電において測定した J_{is} もアンテナは挿入状態なのでロス面積だけでなく、アンテナに1~1.5kVの高周波電圧が印加されていることが損失に大きく影響し、これも大きな原因の一つであると推測される。

3.2 電子温度

1ターンアンテナでの電子温度のRFパワー依存性を単探針法で測定した結果を図3.3に示す。RFパワーが~20kWにおいて電子温度 (T_e) は5~10eVでありアーク放電に比べて約3倍高い結果を得た。また、2、3ターンアンテナにおいても測定したが同様の傾向が見られた。電子温度測定に対する空間電位の高周波振動の影響を除くために、複探針法を用いて測定したが単探針法と同様の結果が得られた。

3.3 運転ガス圧

イオン飽和電流密度のプラズマ源内ガス圧依存性を図3.4に示す。8kWでは J_{is} の最大値は

2.3 実験方法

周波数は2 MHzを選んだ。これは数MHz以下のRF周波数帯域では、磁気との結合が弱くプラズマ分布が均一になり易いと考えられ、また、この周波数帯域は発振器を真空管で製作できるため大出力の高周波電源を容易に入手できることである。また、LBL³⁾、Culham 研究所⁴⁾も2 MHzを使用しており、同じ周波数で効率を比較することができる。

本実験ではアンテナのターン数及び絶縁被覆の有無等によるRFプラズマ源の特性を調べた。特性の評価は、ラングミュアプローブを用いたイオン飽和電流密度及び電子温度の測定、冷却水温差によるプラズマ源及びアンテナの熱負荷測定等により行った。

3. 実験結果と考察

3.1 イオン飽和電流密度

アンテナが1、2、3ターンでのイオン飽和電流密度のRFパワー存在性を図3.1に示す。イオン飽和電流密度 (J_{is}) はRFパワーに比例して線形に増加し、 P_{NET} が20kWにおいて120mA/cm²に達する。またアンテナのターン数が大きくなるほど増加直線の傾きは大きくなる。これは、ターン数を増やすとプラズマとの結合性が大きくなり効率良くRFパワーを入射することができるからであると考えられる。しかし、アーク放電と比較したとき J_{is} は約1/3でありパワー効率はかなり低い結果となっている。原因はいくつかあると推定されるが、一つの原因としてプラズマ中でのアンテナのロス面積が考えられる。図3.2にアンテナ挿入状態でアーク放電を点火しプラズマ源の軸方向にプローブをスキャンしたときの J_{is} の分布図を示すがアンテナ近傍で J_{is} が極端に低下していることがわかる。しかし、アーク放電において測定した J_{is} もアンテナは挿入状態なのでロス面積だけでなく、アンテナに1~1.5kVの高周波電圧が印加されていることが損失に大きく影響し、これも大きな原因の一つであると推測される。

3.2 電子温度

1ターンアンテナでの電子温度のRFパワー依存性を単探針法で測定した結果を図3.3に示す。RFパワーが~20kWにおいて電子温度 (T_e) は5~10eVでありアーク放電に比べて約3倍高い結果を得た。また、2、3ターンアンテナにおいても測定したが同様の傾向が見られた。電子温度測定に対する空間電位の高周波振動の影響を除くために、複探針法を用いて測定したが単探針法と同様の結果が得られた。

3.3 運転ガス圧

イオン飽和電流密度のプラズマ源内ガス圧依存性を図3.4に示す。8kWでは J_{is} の最大値は

0.6Pa 付近に存在し、0.4Pa では J_{is} は最大値の約50%に低下した。しかし、RF パワーを15kW に増加すると、 J_{is} は0.4Pa においても最大値の約85%であった。アーク放電における J_{is} のプラズマ源内ガス圧依存性を図3.5 に示す。0.6Pa 付近に最大値が存在し、8kW のRF 放電と同様の特性である。RF 放電においてはアーク放電の場合と同等以下のガス圧でプラズマを生成することができ、このことはストリッピングロス低減のために低ガス圧運転を指向する負イオン源において望ましい。

3.4 イオン飽和電流密度分布

2ターンアンテナにおける径方向の J_{is} 分布を図3.6 に示す。プラズマ源内中心100mmの範囲内で一様な密度分布となった。図3.7 にアーク放電における J_{is} の分布を示すがRF 放電と同様の分布を示した。中心100mm外での密度低下の原因は閉じ込め磁場の影響と思われる。RF 放電の場合分布図の左端部が右端部に比べて高い。左側にはプローブ挿入口があり、プローブの挿入による密度変化も考えられた。そこで反対方向から挿入した。その結果、右端部の方が高くなる傾向にあり、分布の左右非対称はプローブの影響によるものと考えられる。プラズマ源がアンテナのマイナス電位に固定されており、これらの要因からプローブがアンテナになり電界が集中したことと考えられる。この傾向は1、3ターンアンテナにおいても顕著に現れた。

図3.8 に2ターンアンテナにおけるRF 放電とアーク放電の軸方向の J_{is} 分布を示す。下蓋近傍でのプラズマ密度の低下はRF 放電、アーク放電双方とも同様の傾向を示し、アンテナ軸方向でのプラズマの一様性は良いと考えられる。

3.5 高周波パワーの反射率

1、2、3ターンアンテナにおけるパワー反射率(P_{REF}/P_{FWD})の入射RFパワー(P_{FWD})依存性を図3.9 に示す。3ターンアンテナが最も反射率が小さく入射RFパワーが14kW において反射率は6%程度になり、ターン数が増すほど反射率が減少する。この傾向は入射RFパワーが10kW 以上で大きく現れた。パワーが大きくとターン数が増すほどアンテナとプラズマとの結合性が良くなり、プラズマがRFパワーに吸収される効率が大きくなることが明らかになった。

3.6 整合回路の静電容量

高周波電源から出力されたパワーを効率良くプラズマ源内のアンテナに供給するためには整合をとる必要がある。このため図2.3 に示す整合回路を高周波電源とアンテナの間に配置し、インピーダンスを調整した。VVC-2 は最大1000pF の真空可変コンデンサであり高周波伝送回路に対して直列に組み込まれている。このコンデンサの静電容量を変化させ各RFパワーに対する J_{is} を測定した。図3.10 に J_{is} の整合器静電容量(VVC-2)依存性を示す。入射RFパワーが6kW においては最適静電容量は535pF に存在する。しかし、10kW においては540pF に移行し、14kW においては555pF へと、入射パワーを増加させると最適静電容量も大きくなる傾向にある。入

射 RF パワーを 6 kW から 14 kW へと 8 kW 増加させたときに要求される静電容量の変化は 20 pF 程度であり、RF プラズマ源で RF 入射パワーを変化させることは容易であると考えられる。しかし、 J_{is} の変化曲線はかなり急峻であり 25 pF 以上静電容量を変化させると J_{is} は約 1/2 に減少することが分かった。

3.7 アンテナの絶縁被覆

セラミックボンドにより 2 ターンアンテナを絶縁被覆したときの J_{is} の RF パワー依存性を図 3.11 に示す。比較のために被覆無しでの J_{is} を示すが、明らかに被覆を施した方がプラズマ密度が高くなっているのがわかる。RF パワーが 3.4 kW において、 J_{is} が 49 mA/cm² のポイント (●) が 1 点あるが、これは被覆が異常放電により剥離する前に測定した J_{is} であり、これ以外のポイントは被覆が一部剥離してからの測定値である。すなわち、被覆が完全な場合、アーク放電の約 2/3 程度の J_{is} が得られる。写真 3.1 にセラミックボンドにて被覆した 2 ターンアンテナを示す。放電破壊により高電位側の被覆が部分的に溶けて剥離していることがわかる。今後、絶縁被覆材料の検討をする必要がある。

3.8 熱負荷測定

方向性結合器による入射パワーの測定精度及び装置各部でのパワー損失を把握するため冷却水温差による熱負荷測定を行った。図 3.12 にプラズマ源及びアンテナ熱負荷の RF パワー依存性を示す。RF 放電との熱収支の比較をするためアーク放電パワーが 3.3 kW におけるプラズマ源各部の熱負荷を示す。側壁及び上蓋は 2.49 kW、下蓋は 0.19 kW、アンテナは 0.33 kW であり全熱負荷は 3.01 kW、回収率は 90.1% である。一方、RF 放電では RF パワーが 3.65 kW において全熱負荷は 2.1 kW で回収率は 57.5% でありアーク放電に比して熱収支がかなり悪い結果となった。これは低パワーのところでは方向性結合器での入射パワー測定値に誤差があるためと考えられる。RF 放電におけるプラズマ源各部の熱負荷について述べると、下蓋の熱負荷はほぼ直線的に増加するが、プラズマ源側壁とアンテナは RF パワーが 10 kW を越えると増加が鈍る傾向にあった。これは、アンテナループ内において高密度のプラズマが生成されていることを示すと考えられる。また、RF パワーが 10 kW 近辺から熱負荷の回収率はほぼ 100% に達している。10 kW 以上の方向性結合による入射パワー測定は信頼性が高いと考えられ、RF パワーの大部分が伝送ロスなしに RF プラズマ源に供給されることが確認された。

4. ま と め

長パルス大電流負イオン源を目指して小型のアンテナ挿入型 RF プラズマ源を試作し、周波数 2 MHz の高周波発振器により RF プラズマ生成基礎実験を行った。1、2、3 ターンアンテナの実験を行ったがターン数が増すほど RF パワーの反射率が小さくなる傾向にあり、3 ターンでは

射 RF パワーを 6 kW から 14 kW へと 8 kW 増加させたときに要求される静電容量の変化は 20 pF 程度であり、RF プラズマ源で RF 入射パワーを変化させることは容易であると考えられる。しかし、 J_{is} の変化曲線はかなり急峻であり 25 pF 以上静電容量を変化させると J_{is} は約 1/2 に減少することが分かった。

3.7 アンテナの絶縁被覆

セラミックボンドにより 2 ターンアンテナを絶縁被覆したときの J_{is} の RF パワー依存性を図 3.11 に示す。比較のために被覆無しでの J_{is} を示すが、明らかに被覆を施した方がプラズマ密度が高くなっているのがわかる。RF パワーが 3.4 kW において、 J_{is} が 49 mA/cm² のポイント (●) が 1 点あるが、これは被覆が異常放電により剝離する前に測定した J_{is} であり、これ以外のポイントは被覆が一部剝離してからの測定値である。すなわち、被覆が完全な場合、アーク放電の約 2/3 程度の J_{is} が得られる。写真 3.1 にセラミックボンドにて被覆した 2 ターンアンテナを示す。放電破壊により高電位側の被覆が部分的に溶けて剝離していることがわかる。今後、絶縁被覆材料の検討をする必要がある。

3.8 熱負荷測定

方向性結合器による入射パワーの測定精度及び装置各部でのパワー損失を把握するため冷却水温差による熱負荷測定を行った。図 3.12 にプラズマ源及びアンテナ熱負荷の RF パワー依存性を示す。RF 放電との熱収支の比較をするためアーク放電パワーが 3.3 kW におけるプラズマ源各部の熱負荷を示す。側壁及び上蓋は 2.49 kW、下蓋は 0.19 kW、アンテナは 0.33 kW であり全熱負荷は 3.01 kW、回収率は 90.1% である。一方、RF 放電では RF パワーが 3.65 kW において全熱負荷は 2.1 kW で回収率は 57.5% でありアーク放電に比して熱収支がかなり悪い結果となった。これは低パワーのところでは方向性結合器での入射パワー測定値に誤差があるためと考えられる。RF 放電におけるプラズマ源各部の熱負荷について述べると、下蓋の熱負荷はほぼ直線的に増加するが、プラズマ源側壁とアンテナは RF パワーが 10 kW を越えると増加が鈍る傾向にあった。これは、アンテナループ内において高密度のプラズマが生成されていることを示すと考えられる。また、RF パワーが 10 kW 近辺から熱負荷の回収率はほぼ 100% に達している。10 kW 以上の方向性結合による入射パワー測定は信頼性が高いと考えられ、RF パワーの大部分が伝送ロスなしに RF プラズマ源に供給されることが確認された。

4. ま と め

長パルス大電流負イオン源を目指して小型のアンテナ挿入型 RF プラズマ源を試作し、周波数 2 MHz の高周波発振器により RF プラズマ生成基礎実験を行った。1、2、3 ターンアンテナの実験を行ったがターン数が増すほど RF パワーの反射率が小さくなる傾向にあり、3 ターンでは

RF入射パワー (P_{FWD}) 14kWにおいて反射率を6%に低下させることができ、プラズマとの結合性が大きく有利であることが確認された。一方、イオン飽和電流密度もターン数が増すと高い値となる傾向にあった。

絶縁被覆無しアンテナでのイオン飽和電流密度は、RFパワー (P_{NET}) が20kWでは120mA/cm²であり、プラズマ密度は $6.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ であった。イオン飽和電流密度は、アーク放電に比べて1/3の値でありかなり低い結果となった。しかし、セラミックボンドでアンテナに絶縁被覆を施すことによりイオン飽和電流密度は増大し、RFパワー3.4kWにおいて49mA/cm²の値を得た。アーク放電に比して2/3の値となり、これらより絶縁被覆により高密度のプラズマが得られる可能性が大きくなった。負イオン源を目指す場合、電子温度が10eV程度と比較的高いため磁気フィルターの強度を考慮する必要性が出てくると思われる。これは、高い電子温度を必要とするプラズマ中性化セルには特に有効と考えられる。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、国枝俊介室長、栗山正明室長代理を始めとするNBI装置試験室及び小原祥裕室長を始めとするNBI加熱研究室の皆様に終始協力と有益な議論をして頂きましたことに感謝の意を表します。また、終始激励を頂いた、鹿園直基那珂研究所長、田中裕二核融合装置試験部長、及び島本進核融合工学部長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Y. Ohara et al., Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 91-052, 1991.
- 2) Y. Okumura et al., Rev. Sci. Instrum. 63/4, 2708 (1992).
- 3) K. N. Leung et al., Rev. Sci. Instrum. 62/1, 100 (1991).
- 4) A. J. T. Holmes et al., "DEVELOPMENT OF RF ION SOURCES AND PLASMA NEUTRALISERS", IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Based Neutral Beam Injector, Naka, (1991) 145-158.

RF入射パワー (P_{FWD}) 14kWにおいて反射率を6%に低下させることができ、プラズマとの結合性が大きく有利であることが確認された。一方、イオン飽和電流密度もターン数が増すと高い値となる傾向にあった。

絶縁被覆無しアンテナでのイオン飽和電流密度は、RFパワー (P_{NET}) が20kWでは120mA/cm²であり、プラズマ密度は 6.0×10^{11} cm⁻³であった。イオン飽和電流密度は、アーク放電に比べて1/3の値でありかなり低い結果となった。しかし、セラミックボンドでアンテナに絶縁被覆を施すことによりイオン飽和電流密度は増大し、RFパワー3.4kWにおいて49mA/cm²の値を得た。アーク放電に比して2/3の値となり、これらより絶縁被覆により高密度のプラズマが得られる可能性が大きくなった。負イオン源を目指す場合、電子温度が10eV程度と比較的高いため磁気フィルターの強度を考慮する必要性が出てくると思われる。これは、高い電子温度を必要とするプラズマ中性化セルには特に有効と考えられる。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、国枝俊介室長、栗山正明室長代理を始めとするNBI装置試験室及び小原祥裕室長を始めとするNBI加熱研究室の皆様終始協力と有益な議論をして頂きましたことに感謝の意を表します。また、終始激励を頂いた、鹿園直基那珂研究所長、田中裕二核融合装置試験部長、及び島本進核融合工学部長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Y. Ohara et al., Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 91-052, 1991.
- 2) Y. Okumura et al., Rev. Sci. Instrum. 63/4, 2708 (1992).
- 3) K. N. Leung et al., Rev. Sci. Instrum. 62/1, 100 (1991).
- 4) A. J. T. Holmes et al., "DEVELOPMENT OF RF ION SOURCES AND PLASMA NEUTRALISERS", IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Based Neutral Beam Injector, Naka, (1991) 145-158.

RF入射パワー (P_{FWD}) 14kWにおいて反射率を6%に低下させることができ、プラズマとの結合性が大きく有利であることが確認された。一方、イオン飽和電流密度もターン数が増すと高い値となる傾向にあった。

絶縁被覆無しアンテナでのイオン飽和電流密度は、RFパワー (P_{NET}) が20kWでは120mA/cm²であり、プラズマ密度は 6.0×10^{11} cm⁻³であった。イオン飽和電流密度は、アーク放電に比べて1/3の値でありかなり低い結果となった。しかし、セラミックボンドでアンテナに絶縁被覆を施すことによりイオン飽和電流密度は増大し、RFパワー3.4kWにおいて49mA/cm²の値を得た。アーク放電に比して2/3の値となり、これらより絶縁被覆により高密度のプラズマが得られる可能性が大きくなった。負イオン源を目指す場合、電子温度が10eV程度と比較的高いため磁気フィルターの強度を考慮する必要性が出てくると思われる。これは、高い電子温度を必要とするプラズマ中性化セルには特に有効と考えられる。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、国枝俊介室長、栗山正明室長代理を始めとするNBI装置試験室及び小原祥裕室長を始めとするNBI加熱研究室の皆様に終始協力と有益な議論をして頂きましたことに感謝の意を表します。また、終始激励を頂いた、鹿園直基那珂研究所長、田中裕二核融合装置試験部長、及び島本進核融合工学部長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Y. Ohara et al., Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 91-052, 1991.
- 2) Y. Okumura et al., Rev. Sci. Instrum. 63/4, 2708 (1992).
- 3) K. N. Leung et al., Rev. Sci. Instrum. 62/1, 100 (1991).
- 4) A. J. T. Holmes et al., "DEVELOPMENT OF RF ION SOURCES AND PLASMA NEUTRALISERS", IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion Based Neutral Beam Injector, Naka, (1991) 145-158.

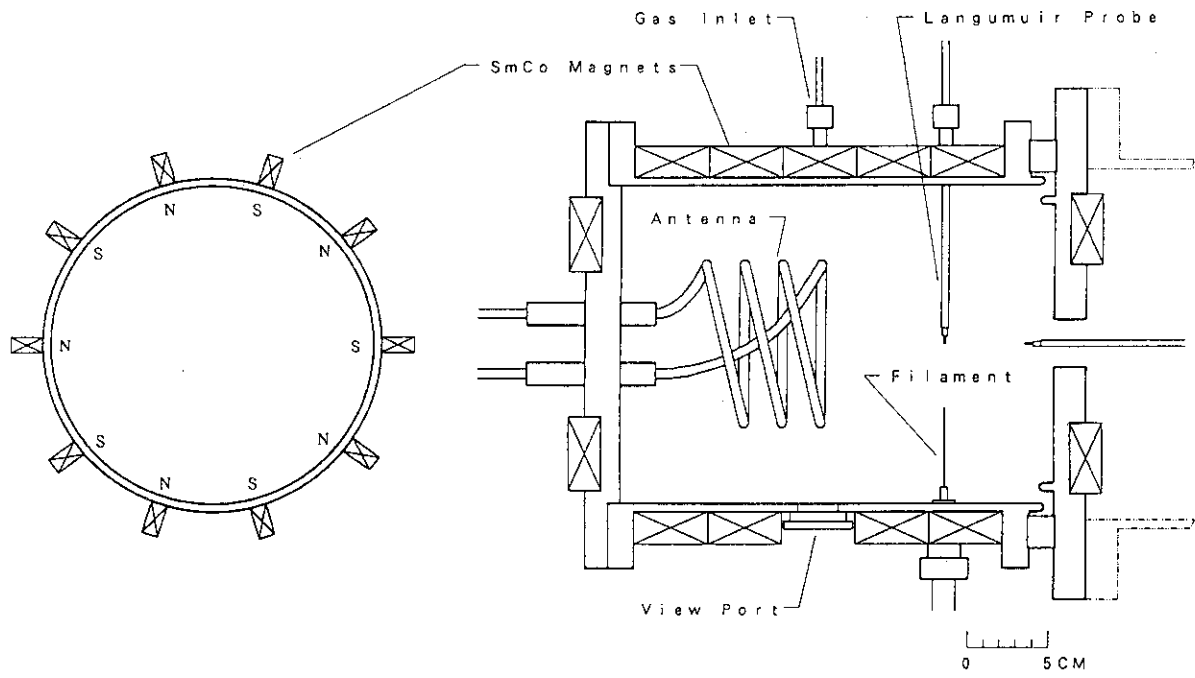


図 2.1 RFプラズマ源模式図

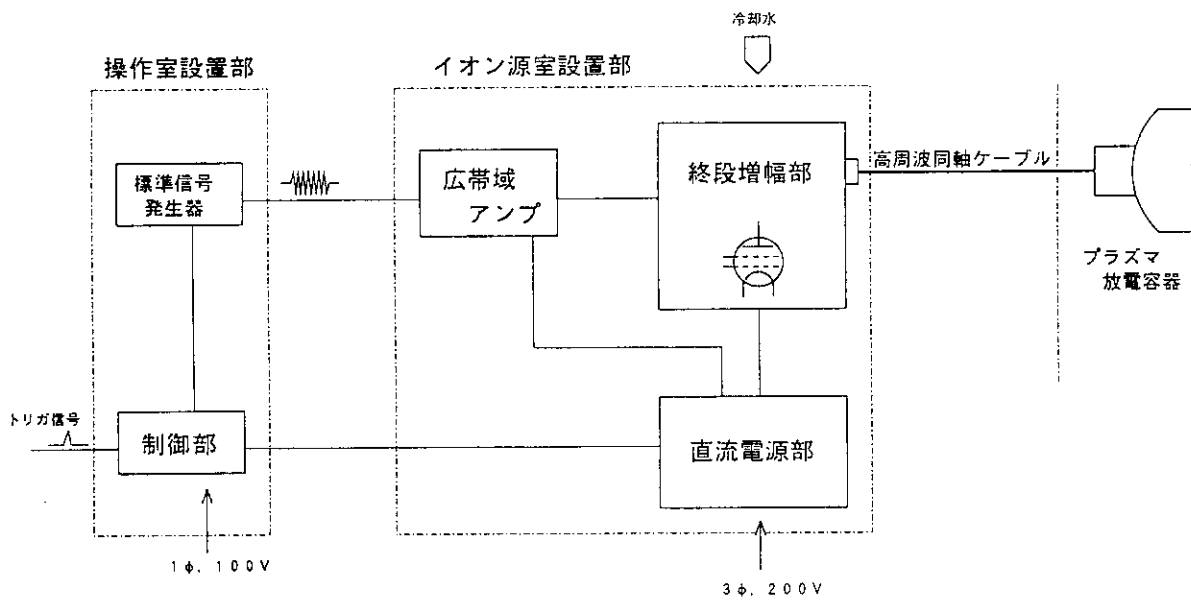


図 2.2 高周波電源システム構成図

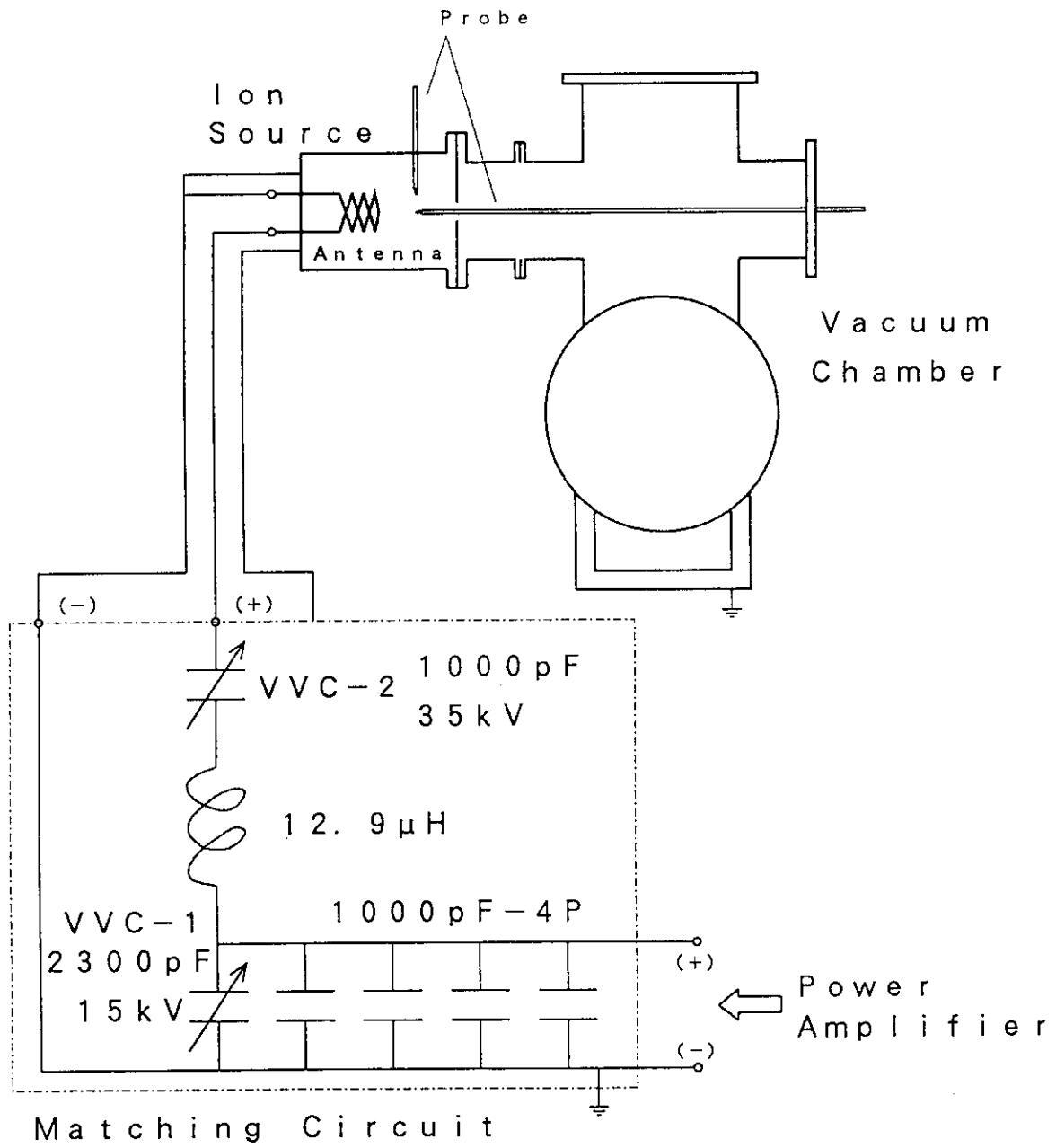


图 2.3 整合器回路图

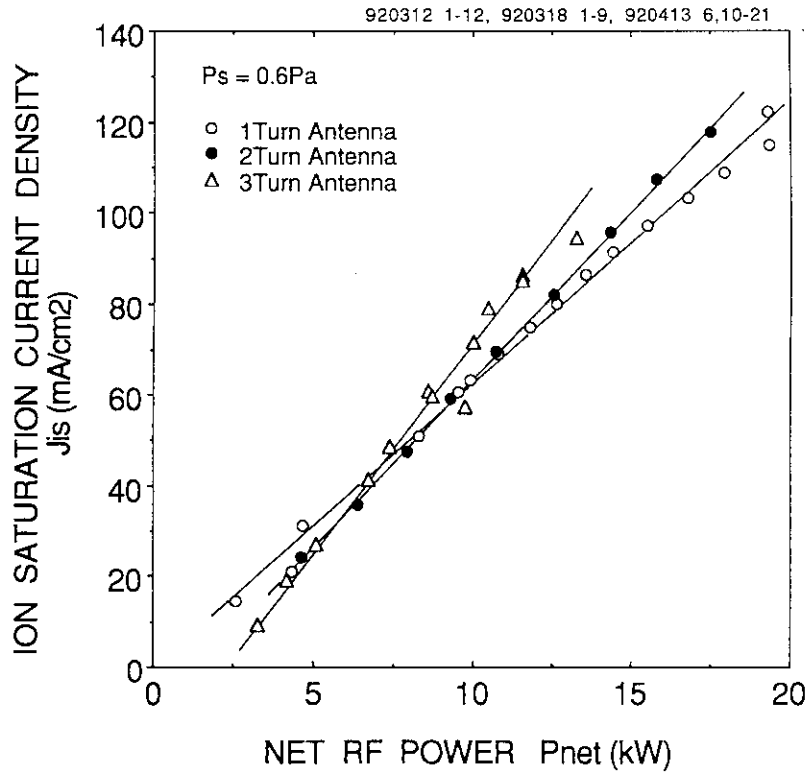


図 3.1 イオン飽和電流密度のRFパワー依存性

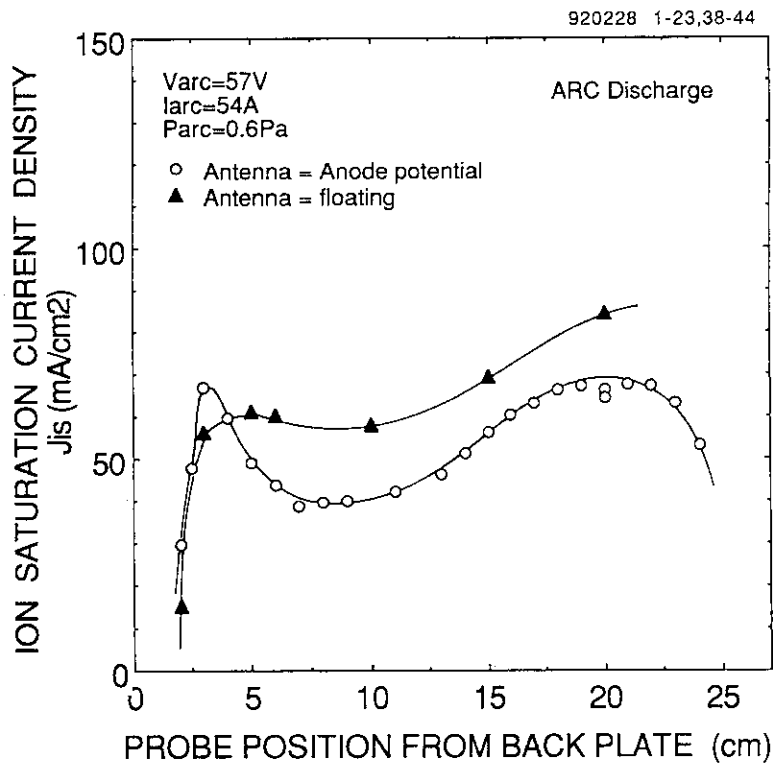


図 3.2 アーク放電によるプラズマ源軸方向のイオン飽和電流密度分布

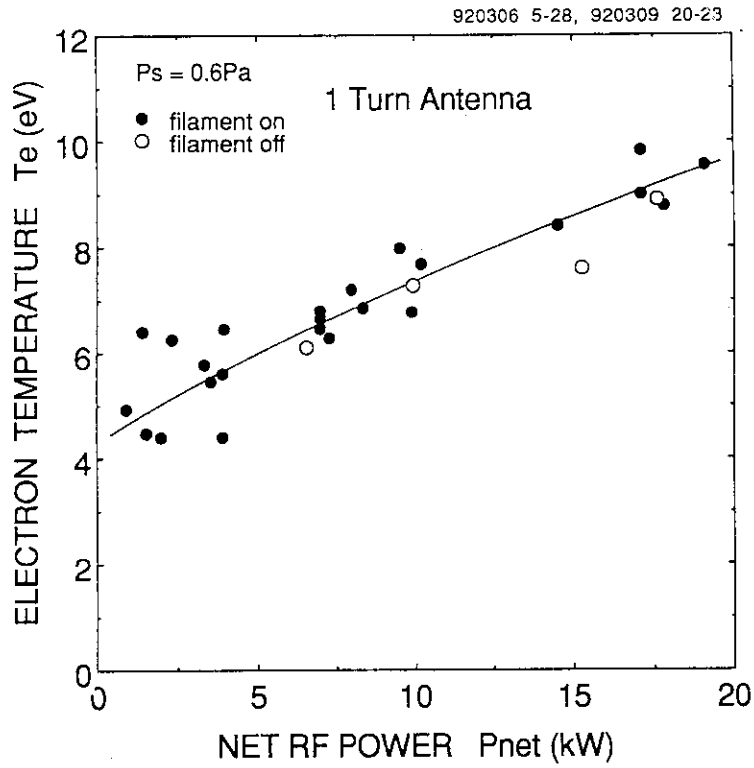


図 3.3 電子温度のRFパワー依存性

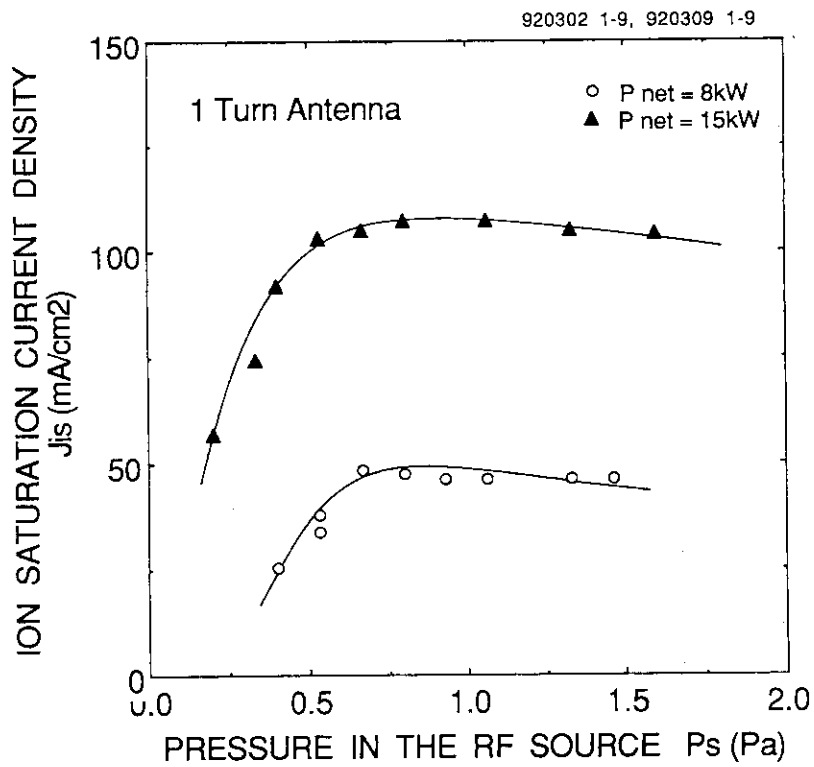


図 3.4 RF放電によるイオン飽和電流密度のプラズマ源内ガス圧依存性

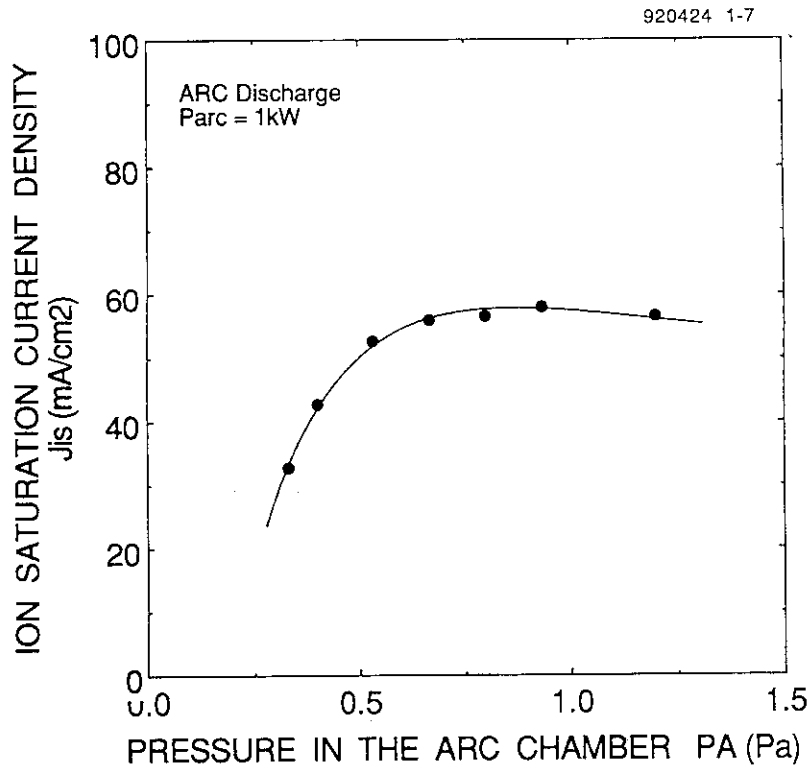


図 3.5 アーク放電によるイオン飽和電流密度のプラズマ源内ガス圧依存性

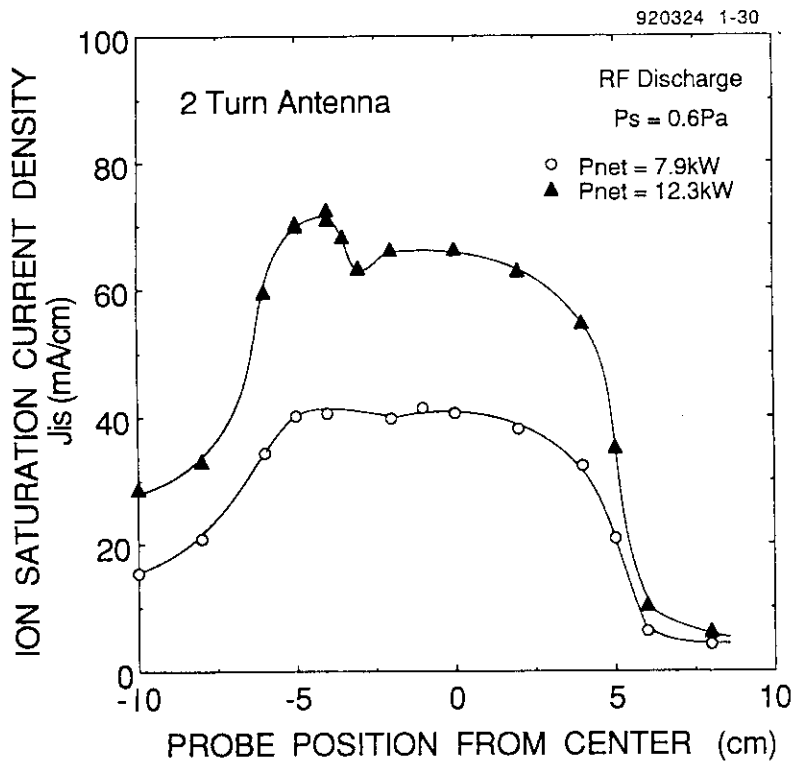


図 3.6 RF 放電によるプラズマ源径方向のイオン飽和電流密度分布

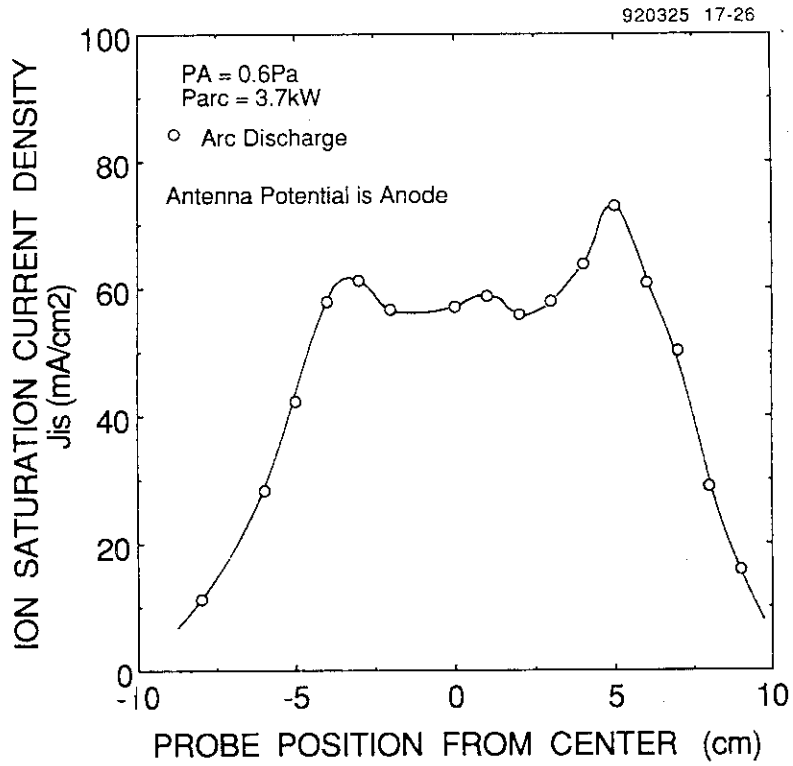


図 3.7 アーク放電によるプラズマ源径方向のイオン飽和電流密度分布

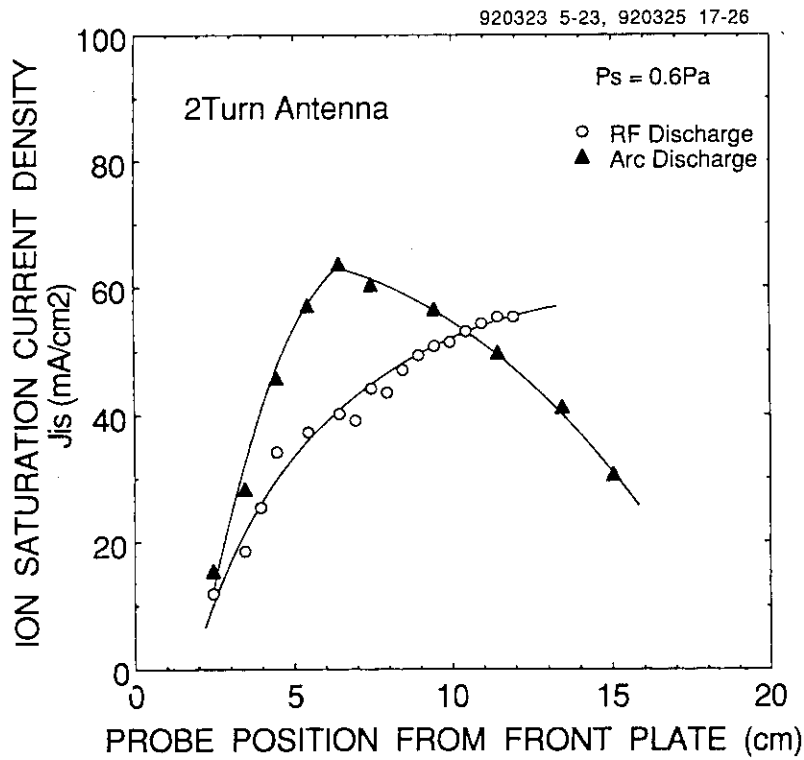


図 3.8 プラズマ源下蓋近傍でのRF放電とアーク放電のイオン飽和電流密度分布の比較

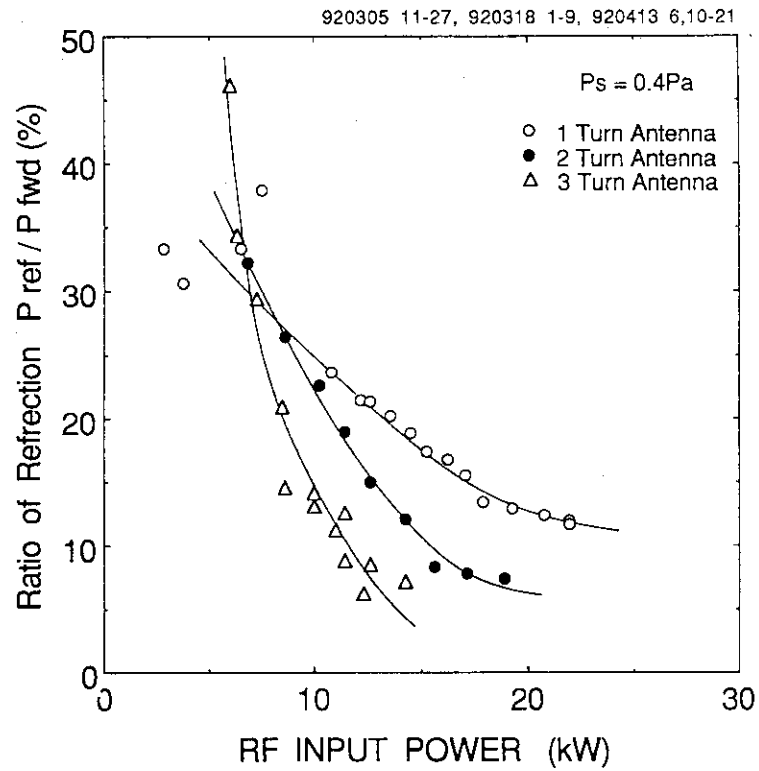


図 3.9 RF 反射率の入射パワー依存性

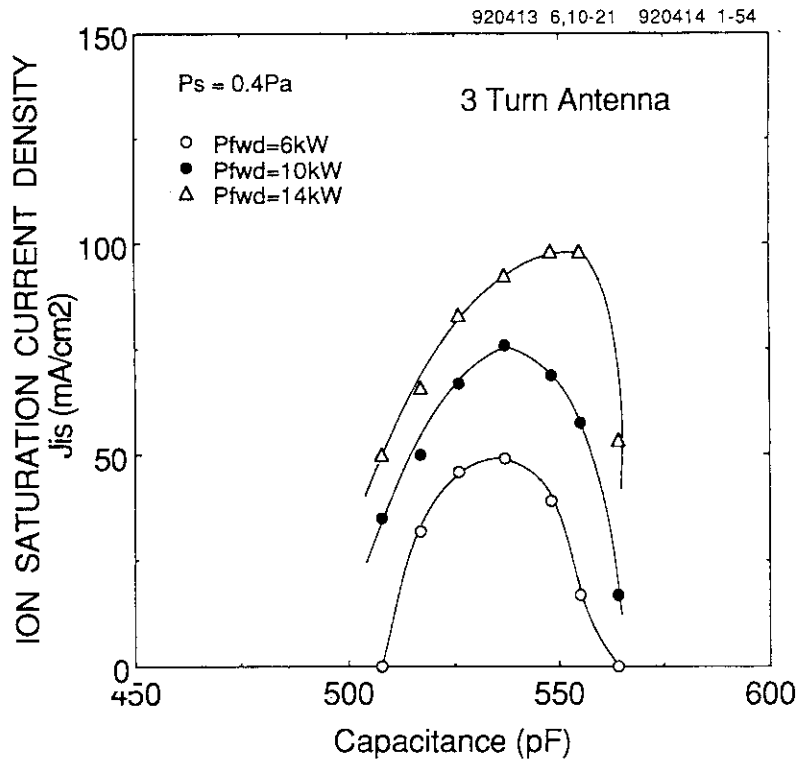


図 3.10 イオン飽和電流密度と静電容量 (VVC-2) の関係

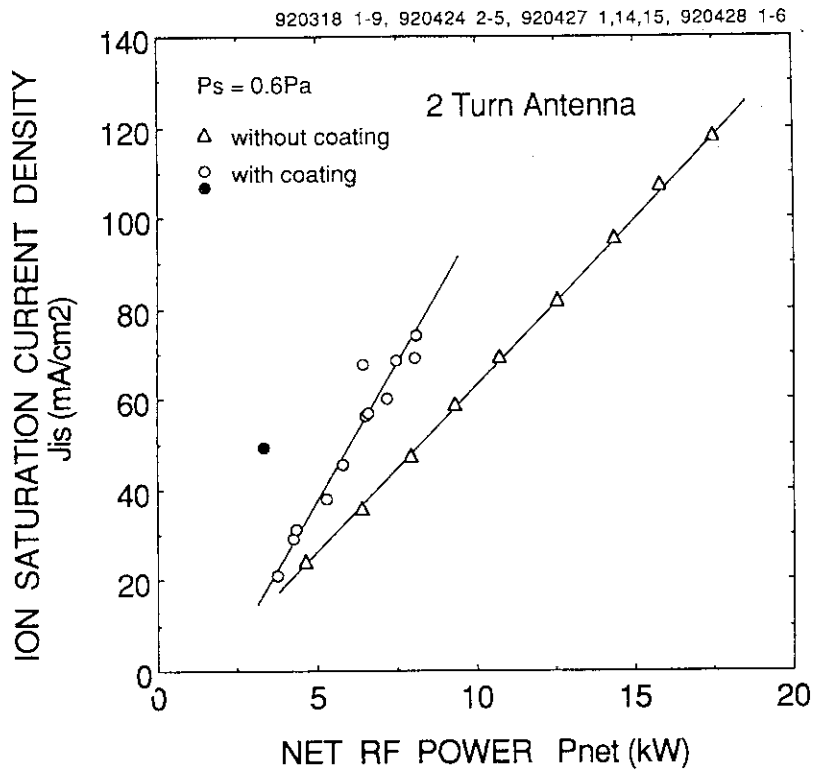


図 3.11 絶縁被覆を施したアンテナのイオン飽和電流密度のRFパワー依存性

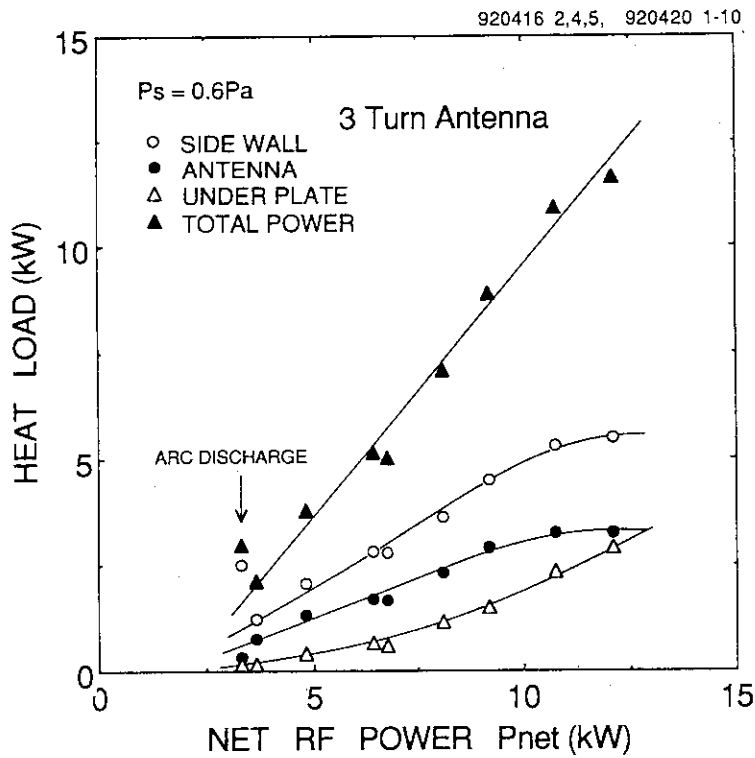


図 3.12 RFパワーとプラズマ源各部の熱負荷の関係

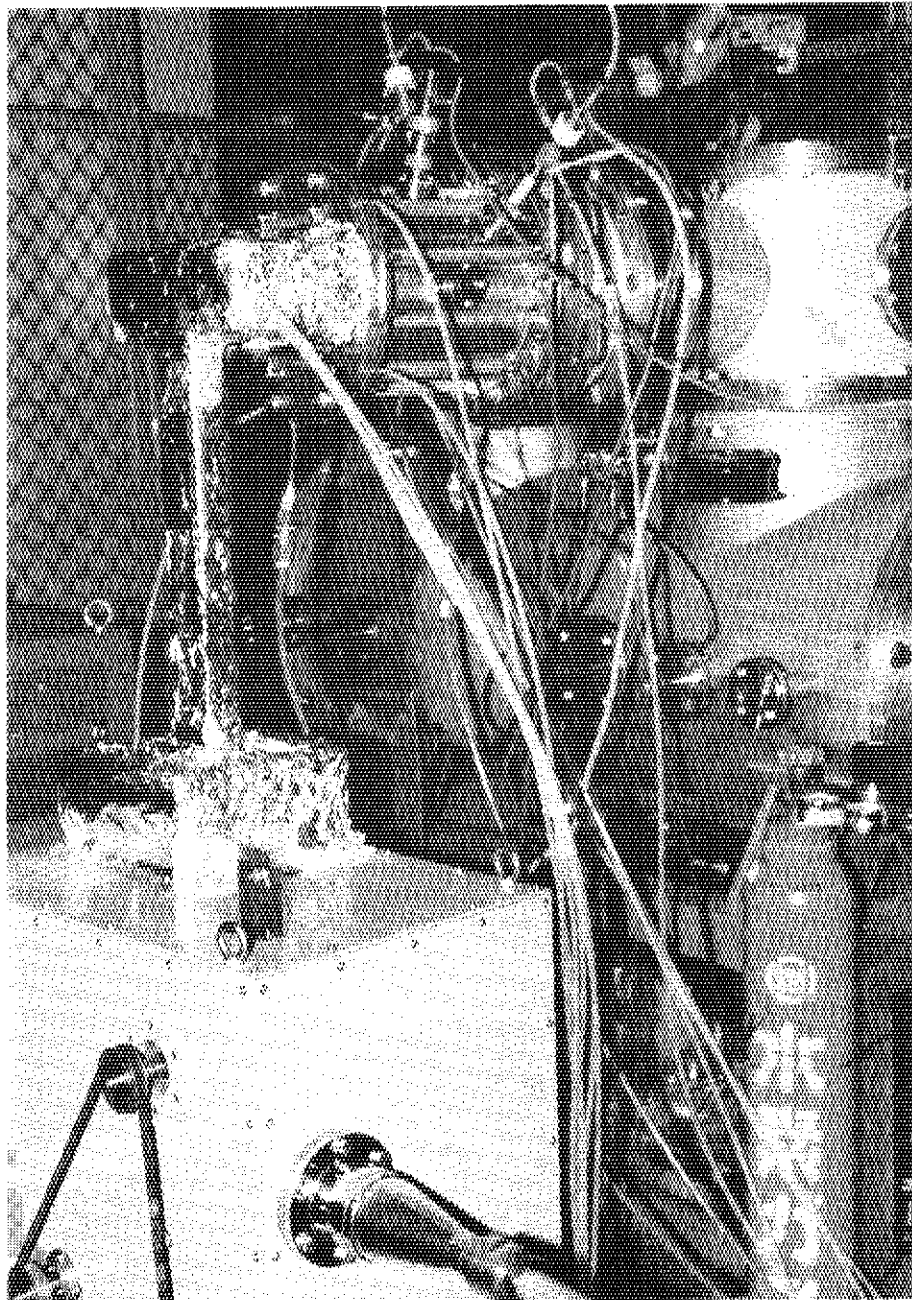


写真 2.1 真空容器に取り付けられたRFプラズマ源

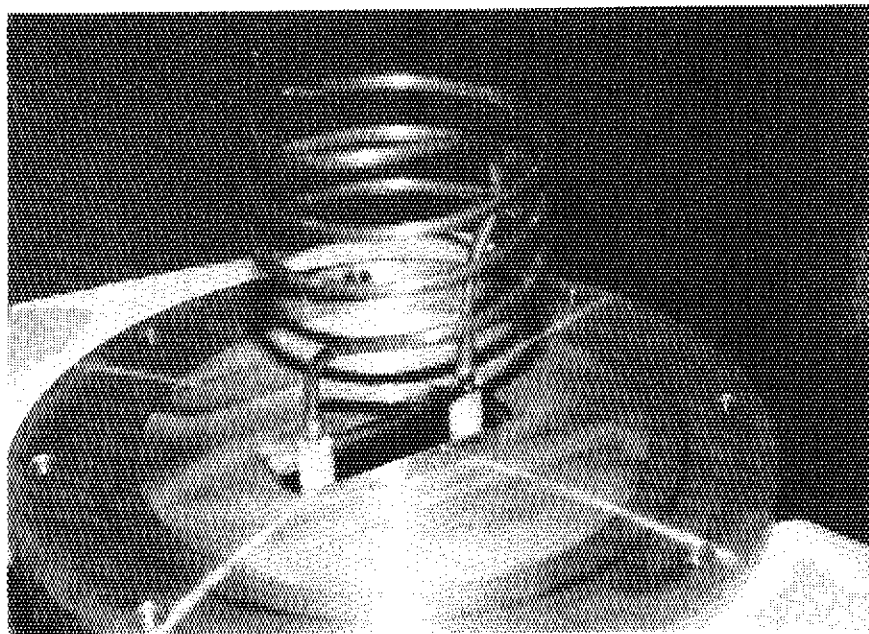


写真 2.2 プラズマ源の上蓋に取り付けられた3ターンアンテナ

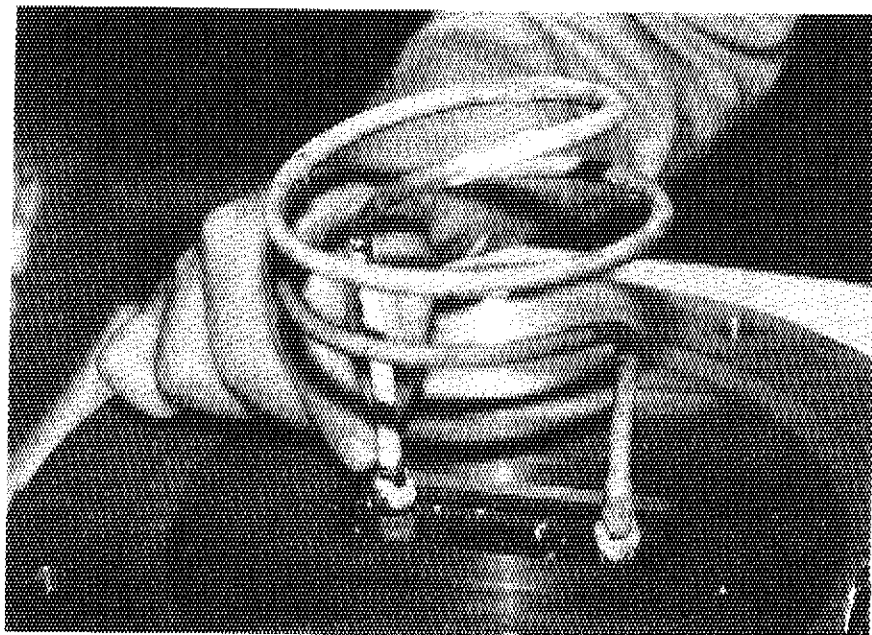


写真 3.1 異常放電により部分的に被覆が剥離した2ターンアンテナ