

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

平成 22 年度

修士論文

磁気圏型プラズマ実験装置 RT-1 の境界領域イオン温度計測
のためのサーマルプローブの開発

2011 年 2 月提出
指導教員 吉田 善章 教授

96065 小林 真也

概要

磁場閉じ込めプラズマの境界部理解はその閉じ込め性能を決定しているため非常に重要である。また、磁気圏型プラズマ実験装置 RT-1 でも同様に境界部における急峻な圧力勾配が報告されており、それは閉じ込めを決定する重要な現象である。そこで我々は、境界部の物理を読み解くべく、様々な計測器を使用し、プラズマ診断を行っている。

現在 RT-1 ではイオン温度計測を、分光計測を用いて行っているが境界部までカバーすることが出来ない。

そこで、サーマルプローブを作成しイオン温度を計測することにより圧力勾配とイオン温度の関係を読み解こうと考えた。

まず、サーマルプローブを作成する前にイオン温度を確実に計測できるか、見積もりを行った。その結果、温度を導出するためにはプローブの熱容量を可能な限り小さくすることが重要と考え、厚さ $D=0.1\text{ mm}$ の構造をもつプローブを設計した。

本プローブを用いて、テストスタンド CPX-1 で動作実験を行った。プラズマ放電時間によりプラズマ電流通電時間と温度上昇のピーク時間が異なることがわかった。さらにプラズマ off 後の温度の時定数が時間の関数となっていることから、放電時間によってプローブ受熱部と計測部における温度平衡、非平衡現象が生じていることがわかった。

まずは放電時間 15 sec~以上の温度平衡状態において model1 を利用して熱量を見積もり、正確なイオン温度を導出し、成功に至った。

更に次のステップとして放電時間~2 sec の温度非平衡状態において model2 (RT-1 の最大放電時間が ~2 sec であることから)を利用して熱量を見積もり、イオン温度を導出した。結果はやや大きな値となった。その理由として考えられるのは、2 sec 放電と短パルスであるためプラズマが定常状態でないことが考えられる。CPX-1 におけるプラズマ生成の Power は最大で 270 (W)である。一方 RT-1 では数 (kW)と高 Power であるため、短パルス放電でも定常状態を考えて良い。よって、この結果は RT-1 における計測が可能であることを示している。

最後に RT-1 において実験を行った。結果は高エネルギー電子の影響で熱量を多く見積もってしまい、イオン温度にすると 100 eV を超える値となってしまった。だが高エネルギー電子の進入を防ぐことが出来ればイオン温度を導出出来る可能性を示せた。

以上、私の研究の過程をまとめると、RT-1 計測の前段階として、テストスタンド CPX-1 で予備実験を行った。その結果、放電時間によってプローブ表面の受熱部と計測部の温度差により、温度平衡と温度非平衡状態が生じていることを確認し、前者は model1 を適用することにより、後者は model2 を適用することによりイオン温度を導出した。その結果、RT-1 において勝算があると見込み実験を行った。

目次

概要

第1章序論 Page 1-15

1.1 背景

1.1.1 プラズマ境界部の物理

1.1.1.1 磁場閉じ込めプラズマの物理

1.1.1.2 磁気圏型装置 RT-1 の物理

1.1.2 プラズマ境界部におけるイオン温度計測手段

1.1.2.1 静電型エネルギー分析器

1.1.2.2 ファラデーカップ

1.1.2.3 勝又探針

1.1.2.4 飛行時間型エネルギー分析器 TOF(Time of Flight)

1.2 目的

第2章サーマルプローブについて Page 16-30

2.1 原理

2.2 RT-1 への適用

2.2.1 熱量の見積もり

2.2.2 設計

第 3 章 実験環境およびその他 Page 31-36

3.1 CPX-1 について

3.1.1 実験環境の構築

3.2 RT-1 について

第 4 章 実験結果および考察 Page 37-58

4.1 CPX-1 における予備実験

4.1.1 動作実験

4.1.2 温度平衡時における実験結果

4.1.2.1 model1 の適用と検証

4.1.2.2 イオン温度の導出

4.1.3 温度非平衡時における実験結果

4.1.3.1 model2 の適用と検証

4.1.3.2 イオン温度の導出

4.2 RT-1 における実験

4.3 考察

第 5 章 結論 Page 59

参考文献 Page 60

謝辞 Page 61-62

学会発表 Page 63

第1章 序論

1.1 背景

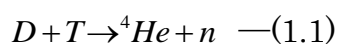
1.1.1 プラズマ境界部の物理

1.1.1.1 磁場閉じ込めプラズマの物理

核融合は 1920 年代、イギリスの天文学者であるアーサーエディントンによって推察された。一方、原子力は 1938 年にオットハーンにより発見され、リーゼマイトナーが検証した。原子力発電は今や日本の総発電量の約 3 割を占め、関心が高まっている温室効果ガスの削減などの理由により、中長期の視野ではさらにその存在力を高めていく。このように、原子力発電は人類にとって必要不可欠な存在である。一方、核融合は原子力に対して発見されるのが早かったのに関わらず、発電するに至っていない。その最大の原因はプラズマの閉じ込めにある。

-核融合発電の原理-

地上で核融合反応を起こさせる物質として考えられているのは重水素 D とトリチウム T による DT 反応である。



DT 反応によって生成される ${}^4\text{He}$ (α 粒子) および中性子はそれぞれ 3.5 [Mev]、14.1 [Mev] の運動エネルギーをもつ。すなわち DT 反応一回で約 17.6 [Mev] のエネルギーが生成される。

この中性子によるエネルギーを核融合炉中にあるブランケットに吸収させる。ここに冷却水を流すことにより、水はエネルギーをもつ。その際、通常であれば水は

水蒸気になるが、圧力を調整することにより液体に保ち、これを熱交換機に導く。ここにある水にもとは冷却水であった高温の水を接触させることにより、水を水蒸気に変え、あとは蒸気タービンをまわすことによって発電を行う。

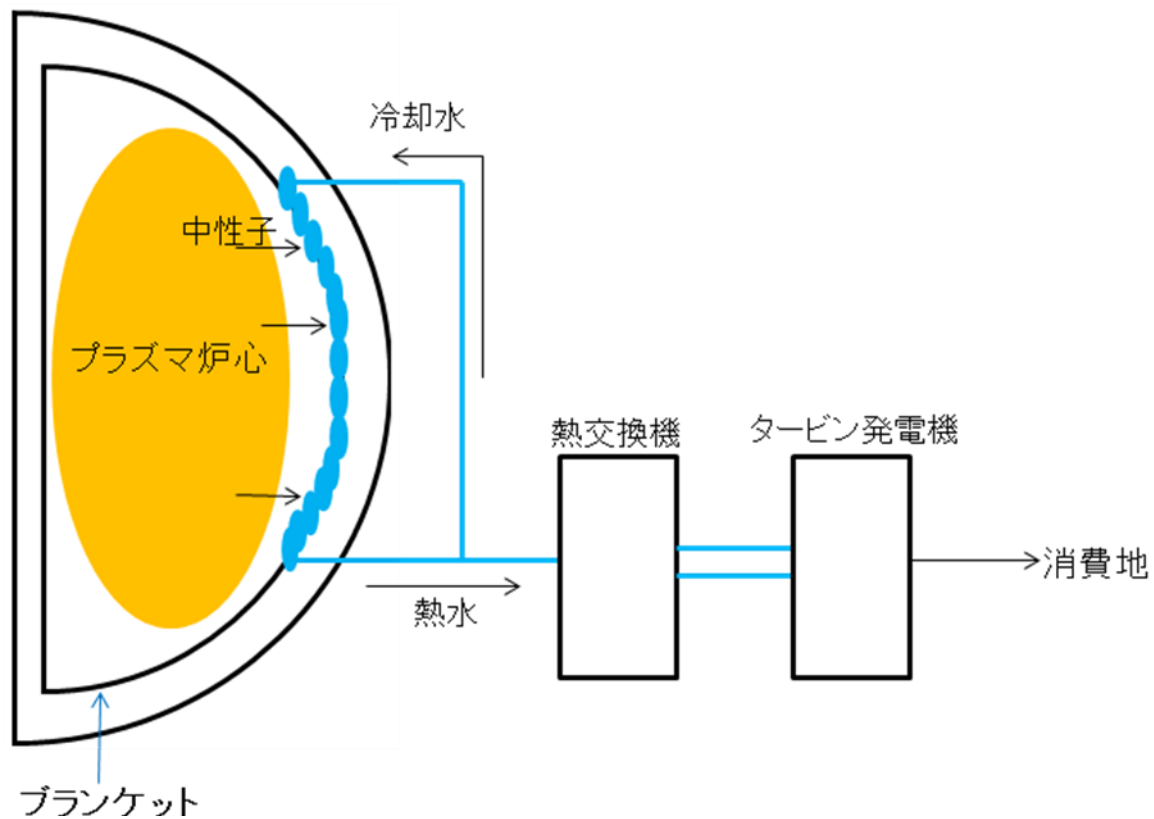


Fig. 1-1. 核融合発電の概略図[1.1]

-経済性について-

当然であるが、核融合炉を運転するために必要な電力以上の電力を DT 反応によって生成しなければ発電炉として意味はない。炉心運転のための電力 P を注入することにより DT 反応が起こる。この結果 P の Q 倍の出力がある。中性子がブランケットに吸収されてからの過程を考えた熱効率を A とすると、電気出力は QAP となる。そのうち割合 B を所内運転のために使うとすると、所外電力は $QA(1-B)P$ となる。そこで経済性を表す、所外電力を核融合出力で割ったプラント効率は、

$$\text{プラント効率} = \frac{QA(1-B)P}{QP} = A(1-B) = A(1 - \frac{1}{QA}) = A - \frac{1}{Q} \quad \text{---(1.2)}$$

となる。

(1.2)式から経済性を考えると、発電効率 A またはエネルギー増倍率 Q を大きくすることが重要だとわかる。ここに DT 反応をプラズマ中で起こす理由がある。

-プラズマ中における DT 反応-

一般に DT 反応は頻繁に起こるものではなく、D と T が弾性衝突を行う確率の方がはるかに高い。この確率を劇的に上昇させる条件が高温高压のプラズマ中である。

-ITER について-

50 年以上に及ぶ先人の核融合研究のより、人類はようやく ITER(国際熱核融合炉)プロジェクトまでこぎつけた。本プロジェクトの目的は、実際に DT 反応をプラズマ中で起こすこととし、次のステップである DEMO 炉試験、商業炉の基礎として位置づけられている。参加国は日本、欧州連合、アメリカ、ロシア、韓国、中国、インドでフランスのガダラッシュに建設予定で、2010 年 12 月時点でようやく建設が始まった。

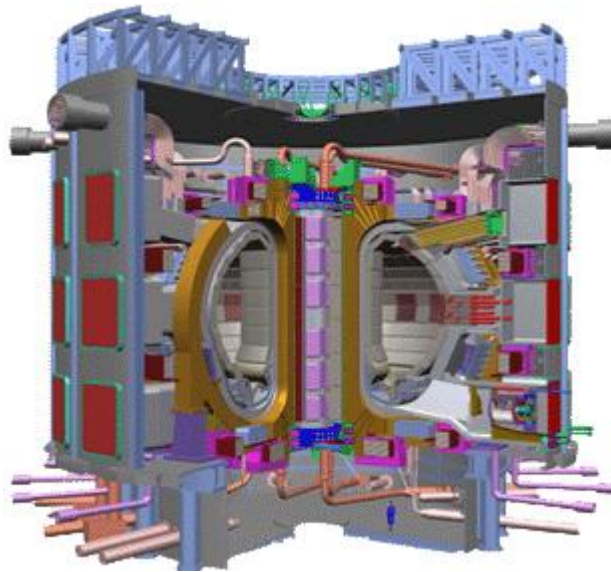


Fig. 1-2. ITER の概略図[1.2]

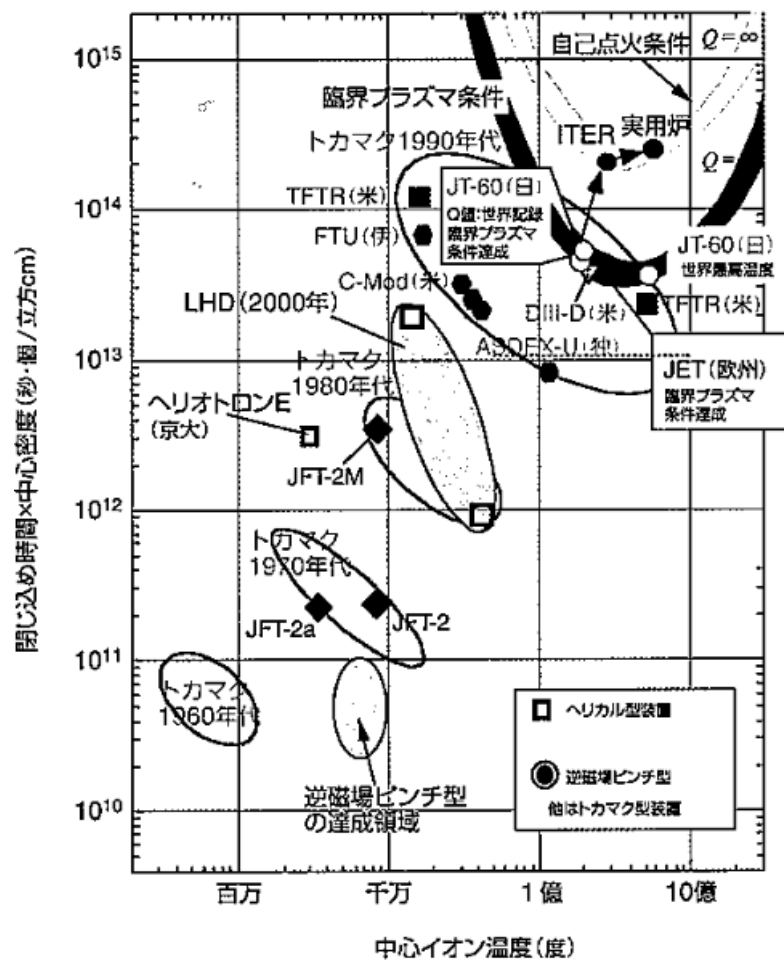


Fig. 1-3. ローソン図[1.1]

そして、長年の研究により ITER の標準運転モードを H モードすることが決定している。これは **High Confinement mode**(閉じ込め状態が良い)の略称で L モード (**High Confinement mode**)と対をなす言葉である。

-H モードについて-

H モードについてさらに詳しく言及する。これはプラズマ周辺部に熱や粒子の拡散を妨げるペデスタル構造を形成し、閉じ込めが良くなるモードである。ペデスタル構造が出来る理由は、熱や粒子の輸送を支配している乱流の層が、プラズマの流れの空間変化によって打ち消されるためと考えられている。このペデスタル構造による閉じ込め向上は全蓄積エネルギーおよそ 50 %に及ぶ場合がある。ペデスタル部の幅はプラズマ半径の約 5 ~10 %と非常に狭いため圧力勾配が大きくなる。そして、この圧力勾配とブートストラップ電流により不安定性が誘起させる。この状態を不安定性 **ELM(Edge Localized Mode)**といい、ペデスタル構造を決定する要因の一つである。また不安定性 **ELM** のエネルギーパルスは、ダイバータ板に大規模な熱、粒子の衝撃を与える。[1.3]

以上のように ITER では H モードによるプラズマ閉じ込めの周辺ペデスタル特性の理解とそれに伴う **ELM** の制御は最重要課題であり、またこの境界における物理は非常に興味深い。

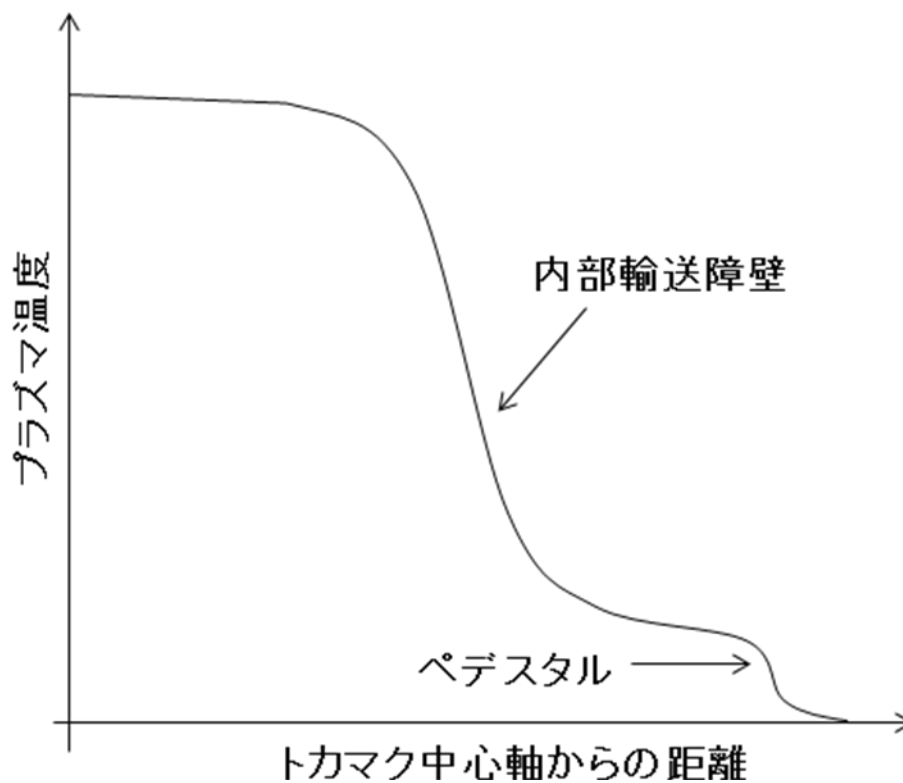


Fig. 1-4. プラズマ温度-中心軸からの距離特性

1.1.1.2 磁気圏型装置 RT-1 の物理

ITER のようなトカマク装置だけではなく、磁気圏型実験装置 RT-1[1.4]においても境界部における興味深い物理が報告されている。以下では RT-1 装置の説明および境界部における物理を説明する。

-RT-1 について-

RT-1 は惑星磁気圏を模したダイポール磁場配位のプラズマ実験装置であり、一連の磁気圏プラズマ研究装置 Proto-RT、Mini-RT の最終段階にあたるものである。

RT-1 実験の目的は大きく分けて以下の三点である。

- ・ 先進核融合を可能とする高 β プラズマの閉じ込め
- ・ 流れをもつプラズマの安定性と動圧効果による平衡状態の探究[1.5][1.6]
- ・ 電子によるトロイダル非中性プラズマの物理解明



Fig. 1-5. RT-1 の外観図

プラズマ生成の主なメカニズムは常電導コイルによって磁気浮上させた超電導コイルにトロイダル方向に大電流を通電し、ポロイダル方向に磁場を生成させ ECH によってプラズマをつけるというものである。RT-1 の断面図および超電導コイルの概念図を(Fig. 1-6)に示す。

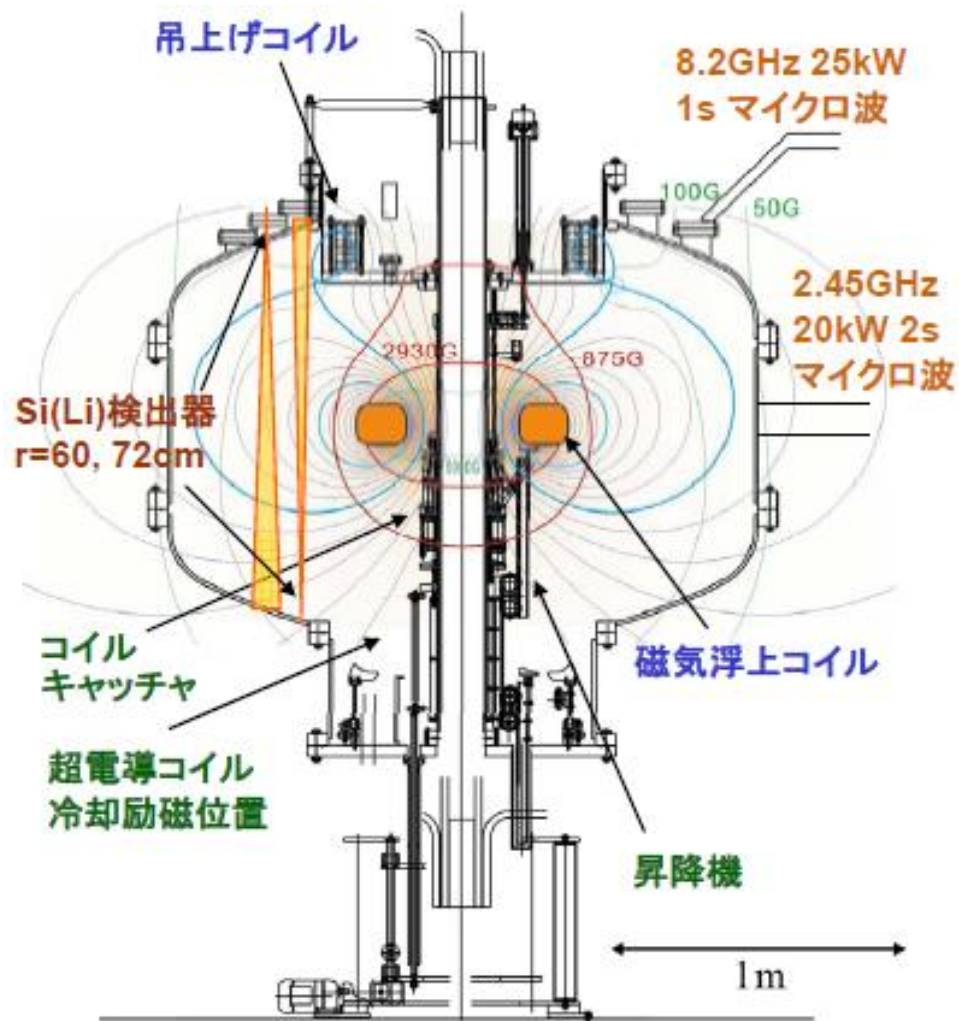


Fig. 1-6. RT-1 の断面図および各装置の位置関係

-超電導コイルについて-

(Fig. 1-7.), (Fig. 1-8.), (Table. 1-1) に磁気浮上超電導コイルの概略図及びコイルの運転パラメータを示す。

コイル本体は高温超電導体である Bi2223 を使用し、永久電流を通電するためのスイッチとして YBCO を使用している。

冷却に関してはコイル温度を 15K まで冷却できる GM 冷凍機を使用している。

また磁気浮上させるため、実験時には冷却系と超電導コイルを着脱させる。その際はコイルの温度観測および磁場などの計測系も着脱出来る仕組みとなっている。

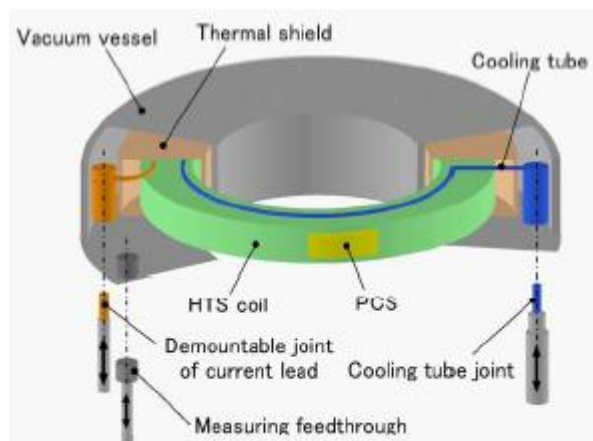


Fig. 1-7. 磁気浮上超伝導コイルの概略図

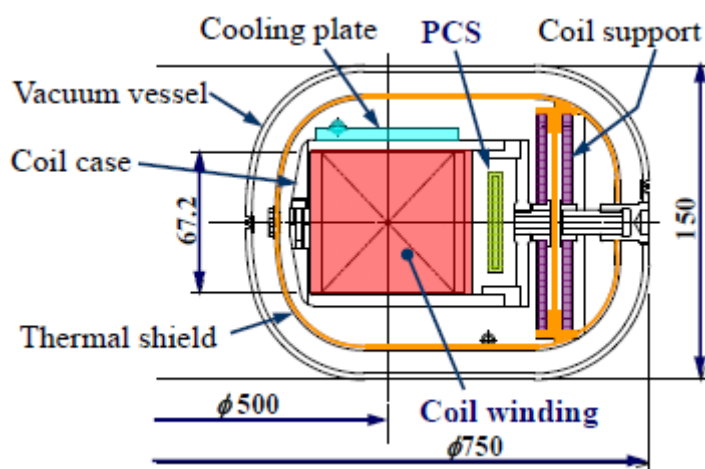


Fig. 1-8. 磁気浮上超伝導コイルの断面図

Table. 1-1. 磁気浮上超電導体の基本パラメータ

巻き方式	Single pancake
巻き数	12
サイズ 直径	500 mm
高さ	67.2 mm
運転時における温度	20 ~30 K
電流値	250 kA(116 A×2160 turn)

-RT-1 におけるプラズマパラメータ-

RT-1 におけるプラズマパラメータを紹介する。

- β は約 40 %、local β は約 70 %
- 電子温度 数十 keV
- 電子密度 $10^{17} / \text{m}^3$
- イオン温度(内部) 最大で約 10 eV 程度

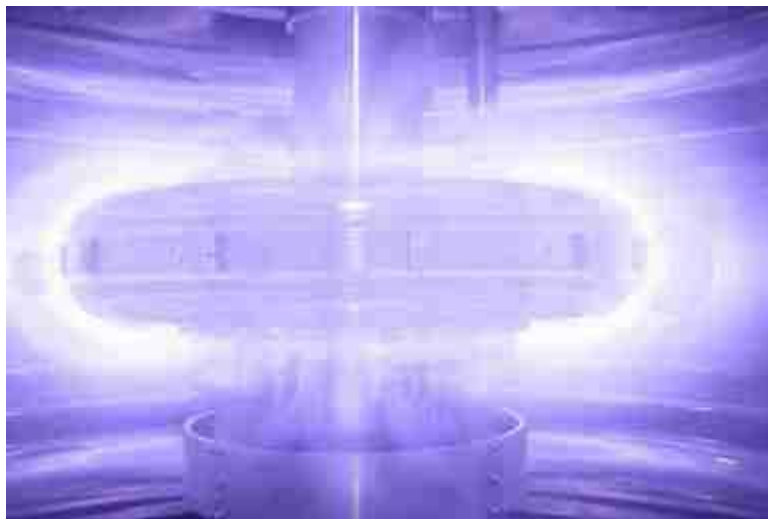


Fig. 1-9. RT-1 におけるプラズマ生成の可視図(CCD による)

-RT-1 境界部における物理-

RT-1 境界部における物理に関して、セパトリックス付近における反磁性電流の反転が報告されている[1.7]。この事実はエッジで急峻な圧力勾配が存在すること意味している。

1.1.2 プラズマ境界部におけるイオン温度計測手段

1.1.2.1 静電型エネルギー分析器

静電エネルギー分析器の中でも磁場を利用したものを紹介する。通常は質量分析のために用いられているが粒子の質量がわかっている場合は運動エネルギーが測定可能である。簡単なファラデーカップの模式図を(Fig. 1-10.)に示す。

原理はイオンのラーマ半径が電子に比べ大きいことを利用したものである。**gate2**にイオンをひくためにバイアス電圧を印加する。すると **gate** 中に電子は進入できずイオンのみ進入する。適当な位置にコレクターを置き、その場所でのみのイオン電流を測定する。**gate1** はプラズマを擾らんさせないようにプラズマ電位と等電位にする。[1-9]

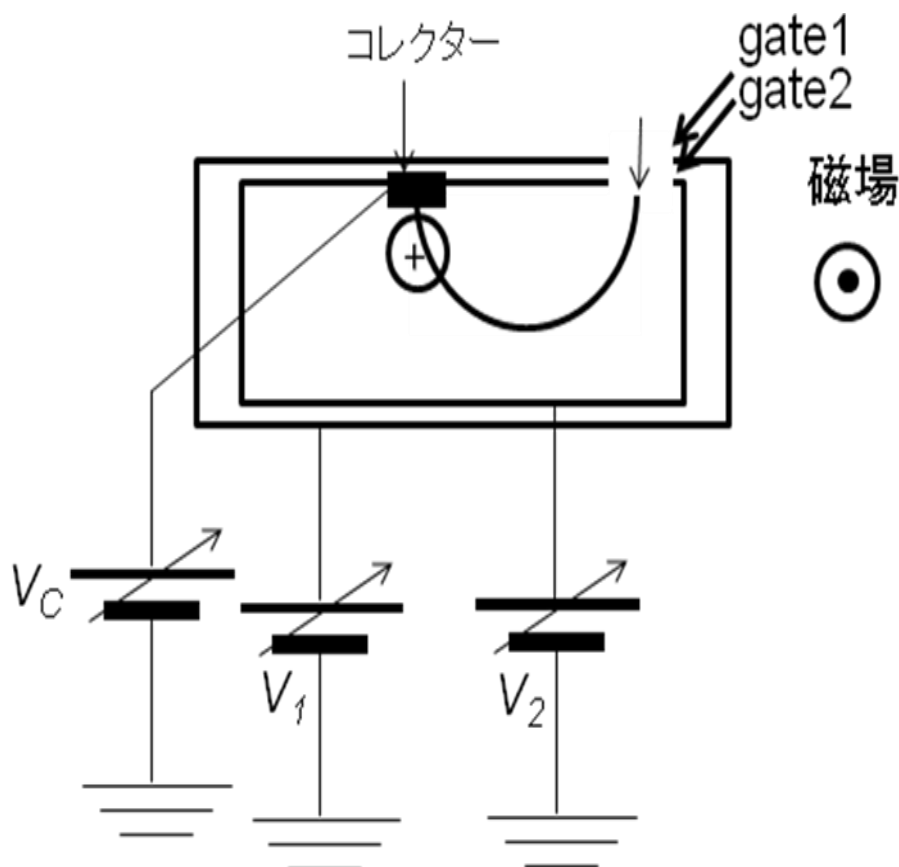


Fig. 1-10. 磁場を利用した静電エネルギー分析器の原理図

1.1.2.2 ファラデーカップ

次は、グリットを用いて電子を排除するファラデーカップ(別名 RFA)を紹介する。
[1-10]

原理図を(Fig. 1-11.)に示す。イオン捕集面前に幾多にも及ぶ電子を排除するための電極を置く。Grid1 の役割は電子を排除するためにバイアス電圧を印加するための電極。Grid2 は二次電子を排除するための電極である。これもプラズマを擾らんさせないように外側の容器をプラズマと同電位にする。
バイアス電圧を印加し捕集電極の電流値を計測して、(1-3)式からイオン温度を導出する。

$$\frac{d}{dV_p}(\log I_i) = \frac{e}{kT_i} \quad -(1-3)$$

簡単な原理図を示したが実際はもっと複雑な構造である。

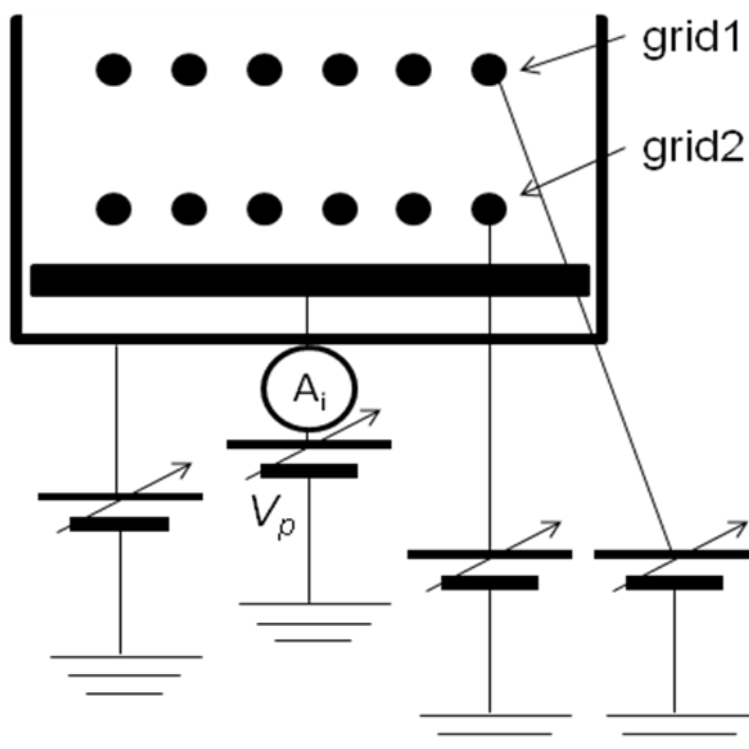


Fig. 1-11. ファラデーカップの原理図

1.1.2.3 勝又探針

勝又探針、別名イオンセンシティブプローブ[1.8]。本プローブはイオンのエネルギー分布を測定することによりイオン温度を導出するプローブである。

簡単な原理を説明するため基本構造を(Fig. 1-12.)に示す。直線磁場 B により電子・イオン共にサイクロトロン運動を行う。その際のラーマ半径は以下である。

$$r_L = \frac{mv_{\perp}}{|e|B} \quad (1-4)$$

式から明らかなようにイオンのラーマ半径は電子のラーマ半径に比べて大きい。この差を利用してイオン捕集電極に電子を進入させないようにしている。そして、バイアス電圧を印加し捕集電極の電流値を計測して、(1-5)式からイオン温度を導出するものである。

$$\frac{d}{dV_p}(\log I_i) = \frac{e}{kT_i} \quad (1-5)$$

実際の構造はもっと複雑で精度を上げるために様々な試みがなされている。

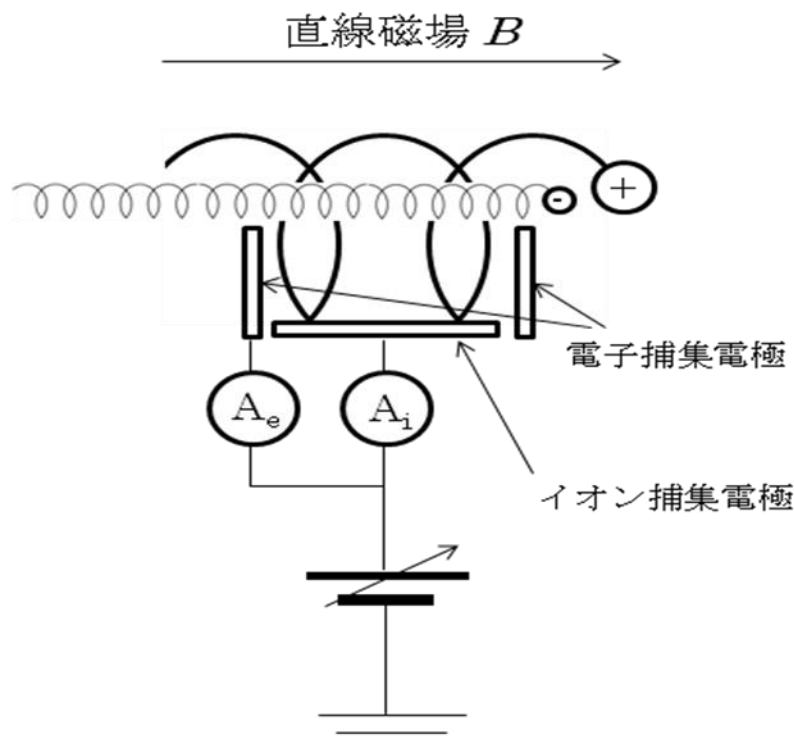


Fig. 1-12. 簡単な勝又探針の原理

1.1.2.4 飛行時間型エネルギー分析器(time-of-flight)

静電エネルギー分析器の飛行時間型分析器を紹介する。
プラズマ中の電圧 V で加速されたイオン(質量 m_i 、電荷 ze)が決まった距離 X を通過するのに必要な時間 T は、

$$T = X \sqrt{\frac{m_i}{2zeV}} \quad -(1\cdot6)$$

以上の式で決まる。時間 T はイオンの質量によって決まる。[1-9]
プラズマなどのイオン源から加速されたイオンは、偏向板にパルスが印加されたときのみ直進してコレクターに達する。これからイオン電流と時間の関係から質量分析を行なう。

1.2 目的

ITER の基本方針であるトカマクの H モードのペデスタル構造は閉じ込めにおける重要な物理である。このように磁場閉じ込めにおけるエッジの物理は、閉じ込め性能に影響するため、様々な研究がされている。

そして RT-1 においてもセパトリックス付近における急峻な圧力勾配が報告されており、イオン温度を計測することによって興味深い物理、すなわち反磁性電流とイオン温度の関係を議論できるかもしれない。

エッジにおけるイオン温度計測手段には先に挙げたように幾つかの方法がある。ファラデーカップは最もよく使われる手段であるが、電子を排除するためのグリッド構造が複雑で成功は難しい。また、勝又単針は強い直線磁場での利用が好ましく RT-1 エッジでは好ましくない。

以上の背景から、私はサーマルプローブを作成し RT-1 境界部におけるイオン温度を計測しようと決意した。

第2章 サーマルプローブについて

2.1 原理

サーマルプローブ研究の歴史を紹介する。本プローブはプラズマ診断において負イオンの計測に用いていた。[2.1]

そして、イオン温度計測の可能性を最初に述べたのは松浦氏である。[2.2]その後、測定データからのプラズマパラメータの決定[2.3]、また更なる改良[2.4]を行い研究がすすめられ、ダイバータ模擬装置 MAP-II [2-5][2-6]やヘリオトロン J[2-7]における実験も行われている。

-原理-

サーマルプローブはバイアス電圧を印加することにより電子を排除しイオンを引き込み、その金属の温度上昇から流入熱量を導出し、イオン温度を計測するものである。すなわちサーマルプローブは以下二点の機能をもつ。

- ① ラングミュアプローブ
- ② イオンによる熱流を吸収する金属

ここでは流入熱量とイオン電流からイオン温度を導出する過程を説明するまでは①②の原理を別々に説明した方が容易に全体を俯瞰しやすいので①②を個別に説明する。

-ラングミュアプローブ-

ラングミュアプローブは別名シングルプローブとも呼ばれ、電子密度および電子温度を計測することが可能である。基本的な測定回路およびプローブ電流-バイアス電圧特性を(Fig. 2-1.)(Fig. 2-2.)に示す。本特性はバイアス電圧により大きく分けて三つの領域に分かれる。

- (a) 電子飽和領域
- (b) 電子反発領域
- (c) イオン飽和領域

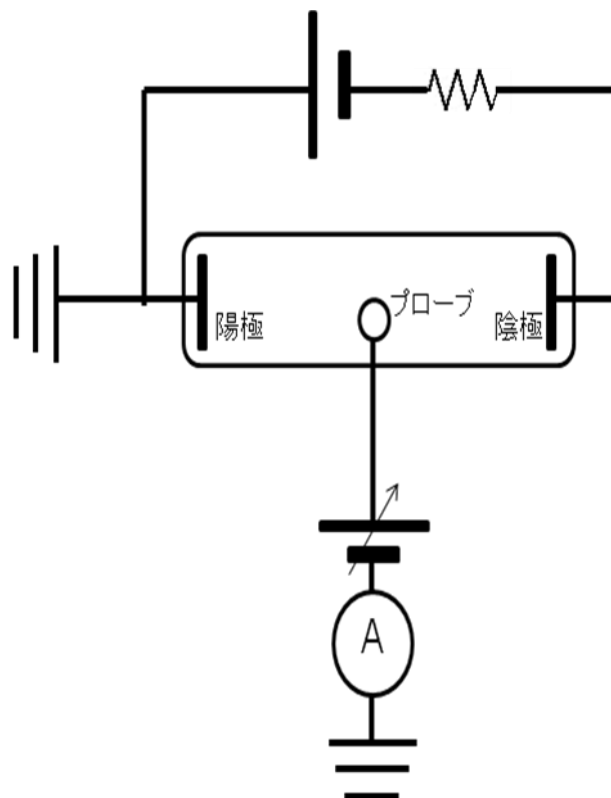


Fig. 2-1. ラングミュアプローブの回路図

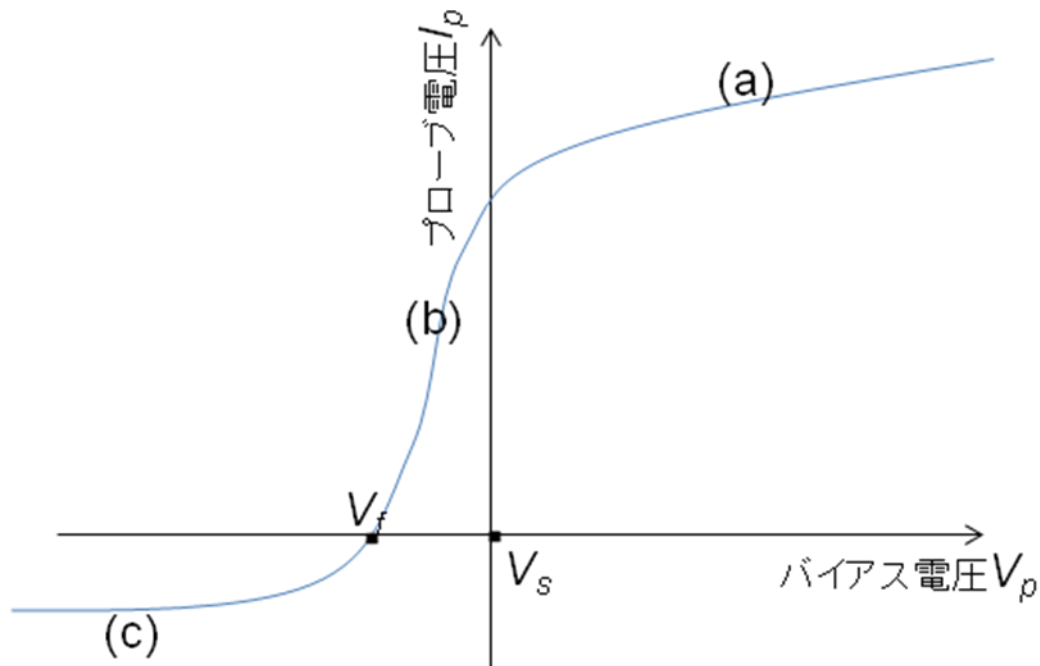


Fig. 2-2. ラングミュアプローブの電流・電圧特性

V_s : space potential

V_f : floating potential

(a) 電子飽和領域について

$V_p > V_s$ の領域を電子飽和領域という。 V_s よりも高い電圧を印加しているので、プローブ表面ではイオンを追い払い、電子を引き寄せる力が作用する。

(b) 電子反発領域について

$V_s > V_p > V_f$ の領域を電子反発領域という。 V_s よりも低い電圧を印加しているのでイオンを引き込み、電子を追い出そうとするが、電子電流はイオン電流に比べ非常に大きいので特性上は電子電流が流れていると解釈してよい。

この際の電子電流は、一般に下式で表せる。

$$I_e = I_{e0} \exp \left\{ -\frac{e(V_p - V_s)}{kT_e} \right\} \quad \text{-(2-1) [2.8]}$$

I_{e0} は $V_p = V_s$ の際の電子電流で、

$$I_e = \frac{1}{4} N_e e v_e S \quad \text{-(2-2) [2.8]}$$

N_e : 電子密度

e : 電荷

S : プローブ面積

で表すことが出来る。

(c) イオン飽和領域について

$V_p < V_f$ の領域をイオン飽和領域という。 V_f 以下の電圧を印加すると電子電流は激減しイオン電流が見えるようになる。

・ 電子温度、電子密度および V_s の求めかた

電子温度 T_e のについては①式両辺の対数をとって、電圧で微分すると(2-3)式になる。

$$\frac{d}{dV} (\ln I_e) = -\frac{e}{kT_e} \quad \text{-(2-3)}$$

$\ln(I_e) \cdot V$ をプロットし、直線部分となっている傾きの逆数が T_e となる。

電子密度 n_e のについては、もとめた T_e を利用して(2-4)式で表せる。

$$n_e \left[\text{個} / m^3 \right] = (3.73 \times 10^{15}) \frac{I}{S(m^2) T_e (eV)^{1/2}} \quad \text{-(2-4) [2.8]}$$

V_s は、 $\ln(I_e) \cdot V$ をプロットし、直線部分となっている部分の延長線と電子飽和電流の傾きの直線との交点である。(Fig. 2-3.)

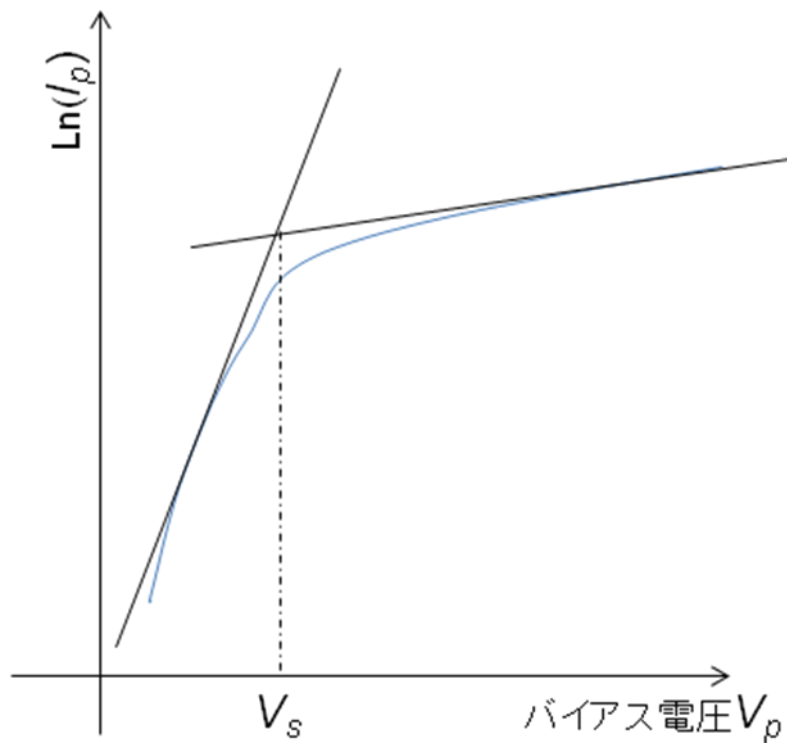


Fig. 2-3. ラングミュアプローブの $\ln(I_p)$ -電圧特性

-熱量評価について-

サーマルプローブにおける熱量評価は 2 パターンある。

- (a) プローブ表面(金属)の全体の温度上昇から熱量を評価する方法[2.2][2.3][2.4]
- (b) 温度勾配を用いるもの[2.5][2.6][2.7]

以上の(a)(b)を説明する。

- (a) プローブ表面(金属)の全体の温度上昇から熱量を評価する方法

プローブ捕集面の質量を m 、その材質の比熱を c 、温度上昇を ΔT とした際、物体全体が得る熱量 Q は、

$$Q[W] = mc\Delta T \quad -(2-5)$$

実際に熱量を評価する際は、これに構造物などの熱損失を勘案して求めなければならない。

- (b) 温度勾配を用いるもの
熱伝導のフーリエの法則より、

$$Q[W] = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2} S \quad -(2-6)$$

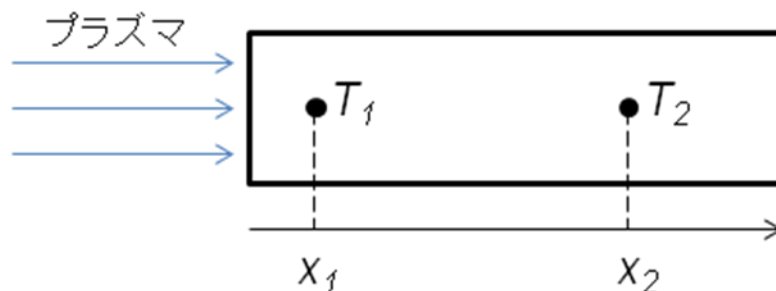


Fig. 2-4. 温度勾配を利用した熱量評価の概略図

・熱量とイオン温度 T_i の関係・

プラズマ境界部におけるシースの周辺を考える。プラズマ粒子がマクスウェル分布に従い、直交座標 (x, y, z) における粒子の速度が (u, v, w) であるとする。粒子が単位面積の断面を一方向に横切ることを考えた際、単位時間当たりの粒子数 A_x を乱雑粒子束という。この際の熱流速 Q_x は以下の式で表すことが出来る。[2-9](ただし、 f_{maxwell} はマクスウェルの確率分布関数)

$$Q_x = \int_0^\infty du \int_{-\infty}^\infty dv \int_{-\infty}^\infty dw \frac{1}{2} m(u^2 + v^2 + w^2) u f_{\text{max well}}$$

$$= 2T \left[J \left(\frac{1}{4} n v \right) \right] \quad \text{---(2-7)}$$

また、 $A_x = \left(\frac{1}{4} n v \right)$ であることから、

$$Q_x = 2T A_x \quad \text{---(2-8)}$$

と表すことが出来る。

(2-8)式が意味することは粒子一個が $2T$ のエネルギーをもっていることである。

そして、実際にイオン熱量のみを計測する際は、バイアス電圧を印加し電子を排除しなければならない。この時、プローブ捕集面にはイオンの熱運動による熱量と同時にシースによる加速エネルギーも入る。これらを考慮した際の流入熱熱量とイオン温度との関係式は(2-9)式である。(I:イオン電流、 $\phi = V_p - V_s$)

$$Q_x = (2T_i [eV] - \phi) I \quad \text{---(2-9)}$$

しかし、実際の実験では(2-9)式で正確なイオン温度を算出することが出来ない。さらに表面の物理現象を考えた項が必要である。

熱量評価に影響を与える現象は 3 点挙げられる。[2-9]

1. エネルギー反射率・・・プローブ捕集面に衝突したイオンは中性になり、ある割合の熱量をもって反射する。
2. 表面再結合・・・イオンが捕集面で中性になる際、再結合エネルギーが表面に放出される。
3. プリシースの影響・・・シースで得るエネルギーに加算する。

このうち、我々が今回用いた流入熱量 Q_{in} とイオン温度 T_i の関係式は、上記 1.2 の影響を考慮した(2-10)式を用いる。

$$Q_{in} = I_i \{ (2T_i - \phi)(1 - cR) + (\varepsilon - W) \} \quad \text{-(2-10)[2-10]}$$

$$\phi = V_p - V_s$$

R : エネルギー反射率

ε : 第一イオン化エネルギー

W : 仕事関数

2.2 RT-1 への適用

2.2.1 熱量の見積もり

我々は設計の前に、イオンの熱運動から熱量を見積もることが出来るのか評価するため、綿密な見積もりを行った。

見積もりは、温度上昇が小さいと予想できるため、温度評価を一点で行うことを想定し、その調査結果から温度勾配型でも測定可能であるか、というプロセスで考えるようにした。

ある小型の金属(ここでは SUS304)にプラズマのイオンの熱運動による熱量が流入したとする。

その際の各パラメータは、

プラズマパラメータ：CPX-1 を想定した際→ $T_i=1$ (eV), $n_i=10^{17}$ (/m³)

物質のパラメータ(SUS304)：密度 8.0×10^6 (g/m³), 比熱 0.5 (J/gK)

$$\text{流入熱量 } Q = mc \times \Delta T = n_i \times v \times S \times eT_i \quad -(2-11)$$

よって、温度上昇は ΔT は

$$\Delta T = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{17} \times 6.9 \times 10^3 \times 1 \times r^2 \pi}{r^2 \pi D \times 8.0 \times 10^6 \times 0.5}$$
$$\Delta T = \frac{1.6 \times 6.9 \cdot 10}{4.0 \times 10^6 \times D} \quad -(2-12)$$

となる。

正確に熱量を見積もるためには、温度上昇 ΔT を大きくする必要がある。(2-12)式から温度上昇 ΔT はプローブの面積に関係なく、厚さに依存する。よって、厚さを薄くすればするほど、温度上昇を多く見積もることが出来る。

ハード面で加工が可能な、極小の厚さ $D=0.1$ mm を想定すると、

$$\Delta T = 0.0276$$

となる。

温度上昇を計測する際に用いる熱電対の温度分解能は 0.1 であるので、計測範囲外である。そこで、起電力から温度を見積もれば、0.01 オーダーで計測が可能になる。よって、 $D=0.1 \text{ mm}$ のプローブを用いれば、熱量を見積もれると判断した。

そして、仮に温度勾配を用いて計測を行う際には単純に考えて $D=100 \text{ (mm)}$ の物体を挿入した際、熱容量は 0.1 mm に対して約 1000 倍になってしまいとても計測できる状況にないと考え、一点モデルの構造を用いることに決定した。

実際の実験においては、イオンによる熱運動とイオン衝撃による熱量が温度上昇分となる。イオン衝撃エネルギーとはイオンを引き込むためにバイアスを印加した際、イオン電流が通電する。その $(V_p - V_s)$ とイオン電流の積である。

境界部の複雑な物理を無視した式は、

$$Q = \alpha + (V_s - V_p) \times I_p \quad -(2-13)$$

となる。

この α はイオンによる熱運動の項である。

2.2.2 設計

先の見積もりから短パルス型のサーマルプローブを設計する。

また、RF プラズマのような無電極放電についてはシングルプローブの特性が思うように出ないことが知られている。よって、捕集面だけではなく基準電極も作成することにした。

-捕集面について-

プローブ捕集面の金属には加工が容易で非磁性の SUS304 を使用する。

SUS304 の捕集面積または厚さは以下の理由からそれぞれ、 $\phi=16 \text{ mm}$, $D=0.1 \text{ mm}$

の円板形状とする。

$\phi=16\text{ mm}$ について→熱電対で温度上昇を計測する。その際、熱電対は当然、熱容量をもってしまい、 ϕ が小さいと熱量を見積もるのに困難であるから。また、 ϕ を大きくするとプラズマを擾ランさせてしまうことがあるため、それらを勘案した結果、 $\phi=16\text{ mm}$ と決定した。

$D=0.1\text{ mm}$ について→厚さを薄くすればするほどより高い温度上昇を期待できる。そして、ハード面で加工がぎりぎり出来る厚さが $D=0.1\text{ mm}$ である。

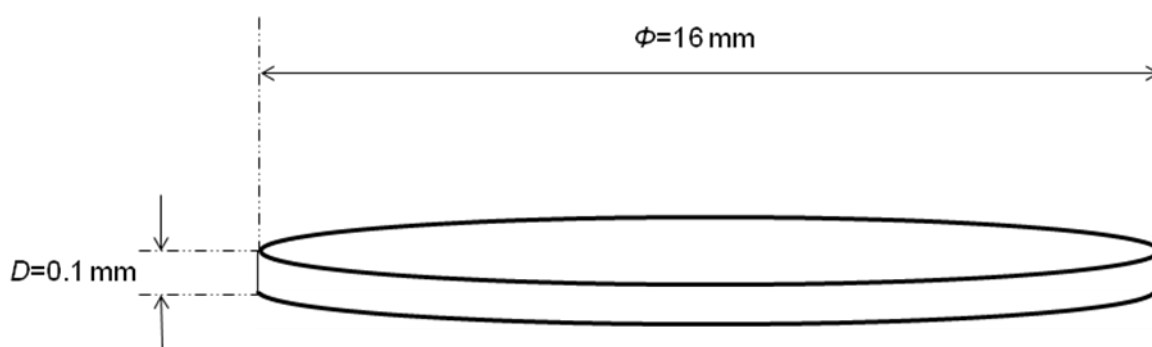


Fig. 2-5. サーマルプローブ捕集面(SUS304)の寸法

-熱電対およびバイアス線の装着-

捕集面裏には熱電対およびイオンを引き込むためのバイアス線を装着した。熱電対に関しては K 型(アルメル・クロメル)熱電対を選んだ。それを捕集面と厚さ $D=0.1\text{ mm}$ 、 $L=1\text{ mm}$ の四角柱の間にはさみ、スポット溶接で固定する。この固定面はちょうど捕集面の中心にくるようにする。

バイアス線に関して、真空中でも用いることが可能な純フロン線を使用し、これも捕集面とスポット溶接を利用して固定した。

また、プローブ捕集面のみにプラズマが接触するようセラミックスを配した。

以上をまとめた概略図が(Fig. 2-6.)である。

特に工夫が必要な点は、捕集面とセラミックスの間にプラズマが進入しないよう、バイアス線にボルトとねじを介して張力をもたせることであった。

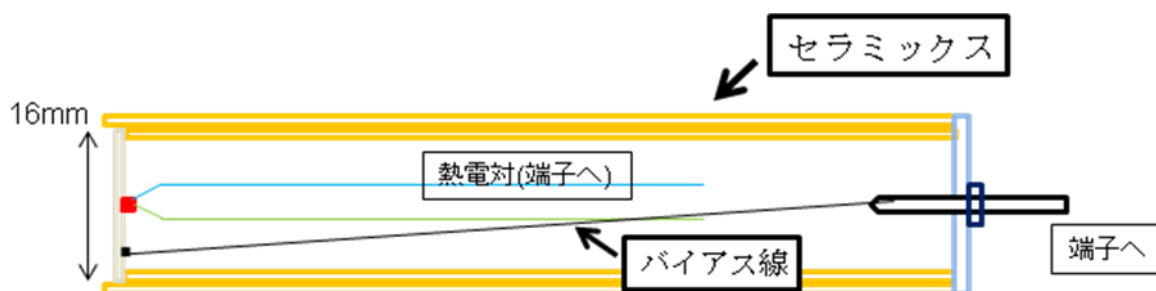


Fig. 2-6. 制作したサーマルプローブの概略図

-基準電極について-

基準電極については、プローブ電圧-プローブ電流特性をシングルプローブの特性にするため、捕集面の面積に対して約 10 倍の面積になるように設計した。つまり非対称のダブルプローブとなるようにした。

RTにおける基準電極

- ・捕集面に対して約 17 倍の面積をもたせた。その理由は、RT-1 において電極間が離れれば離れるほどノイズを拾ってしまう。そのため、同一ポートから両電極を導入しなければいけないため、進入可能な最大の大きさにした。

CPX-1 における基準電極

- ・捕集面に対して約 80 倍の面積をもたせた。

実際に作成したサーマルプローブとその電極

RT-1

以下に RT-1 および CPX-1 の実験において使用したサーマルプローブを示す。

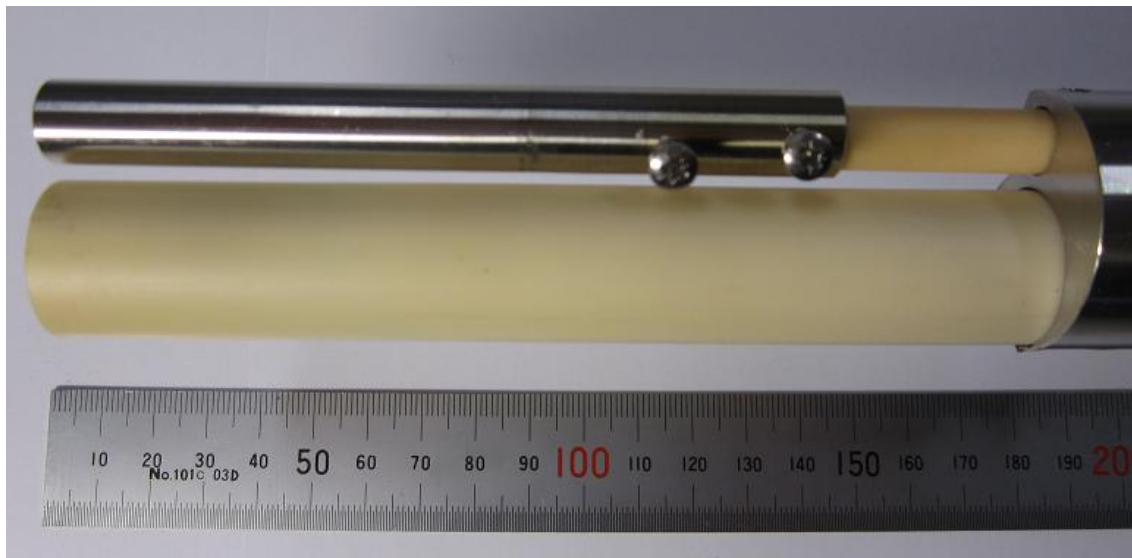


Fig. 2-7. 横から見たサーマルプローブと基準電極(RT-1)



Fig. 2-8. 斜め前から見たサーマルプローブと基準電極(RT-1)

CPX-1



Fig. 2-9. 横から見たサーマルプローブ(CPX-1)

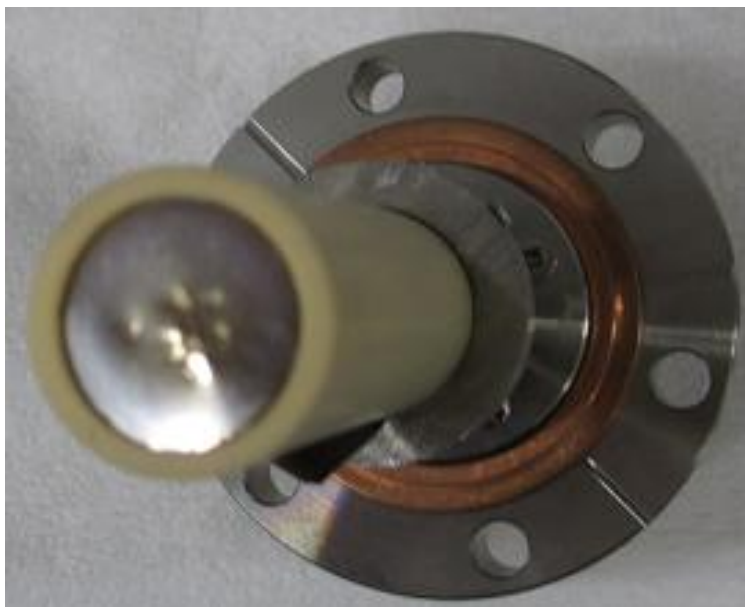


Fig. 2-10. 上から見たサーマルプローブ(CPX-1)



Fig. 2-11. 横から見た基準電極(CPX-1)

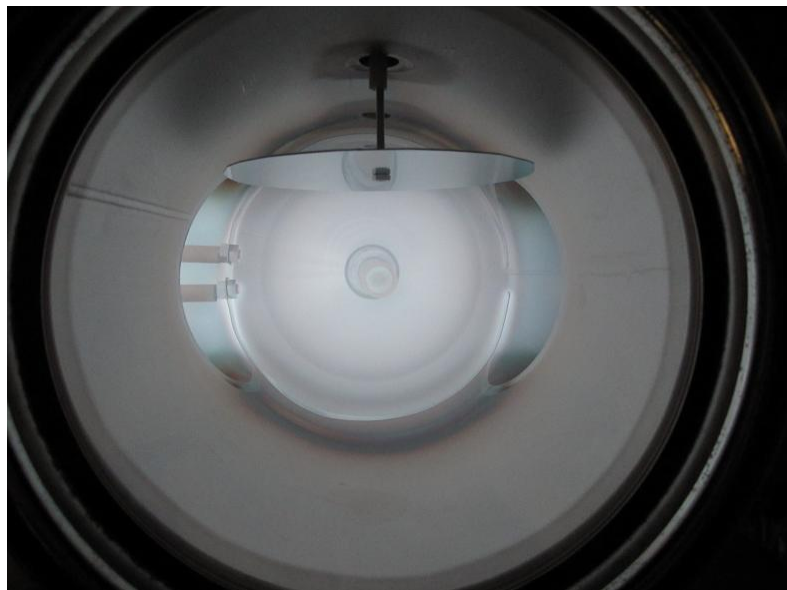


Fig. 2-12. プラズマ生成時の CPX-1 におけるサーマルプローブと基準電極

第 3 章 実験環境およびその他

3.1 CPX-1 について

本研究では RT-1 におけるサーマルプローブの実験を行う前の予備実験としてテストスタント CPX-1 で実験を行った。プラズマ生成は 13.56 MHz の高周波を使用し、Power= ~270 W で動作させている。主な容積およびプラズマパラメータを (Table. 3-1.) に、プラズマ生成時の写真を (Fig. 3-1.) に示す。

(Table. 3-1.)

寸法(円柱容器)	奥行 (mm)	280
	手まえ ϕ (mm)	150
プラズマパラメータ		
T_e (eV)		1 桁
n_e (/m ³)		10^{17}
その他		定常プラズマ 磁場なし

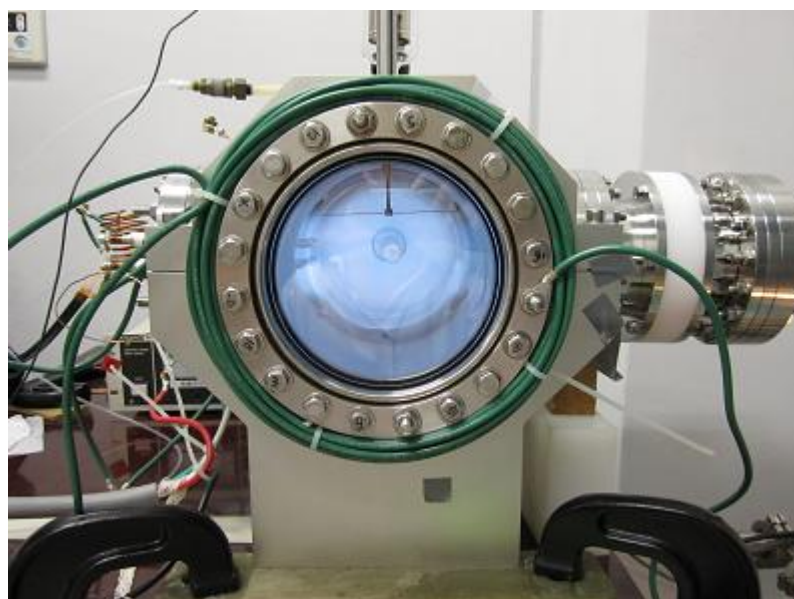


Fig. 3-1. CPX-1 におけるプラズマ生成(Gas He)

3.1.1 実験環境の構築

-真空計について-

CPX-1 の真空系として、ポンプをターボポンプおよびロータリーポンプ、圧力計を電離真空計およびピラニ真空計を使用している。各配置を紹介するため回路図および実際のものを(Fig. 3-2.), (Fig. 3-3.), (Fig. 3-4.)に示す。

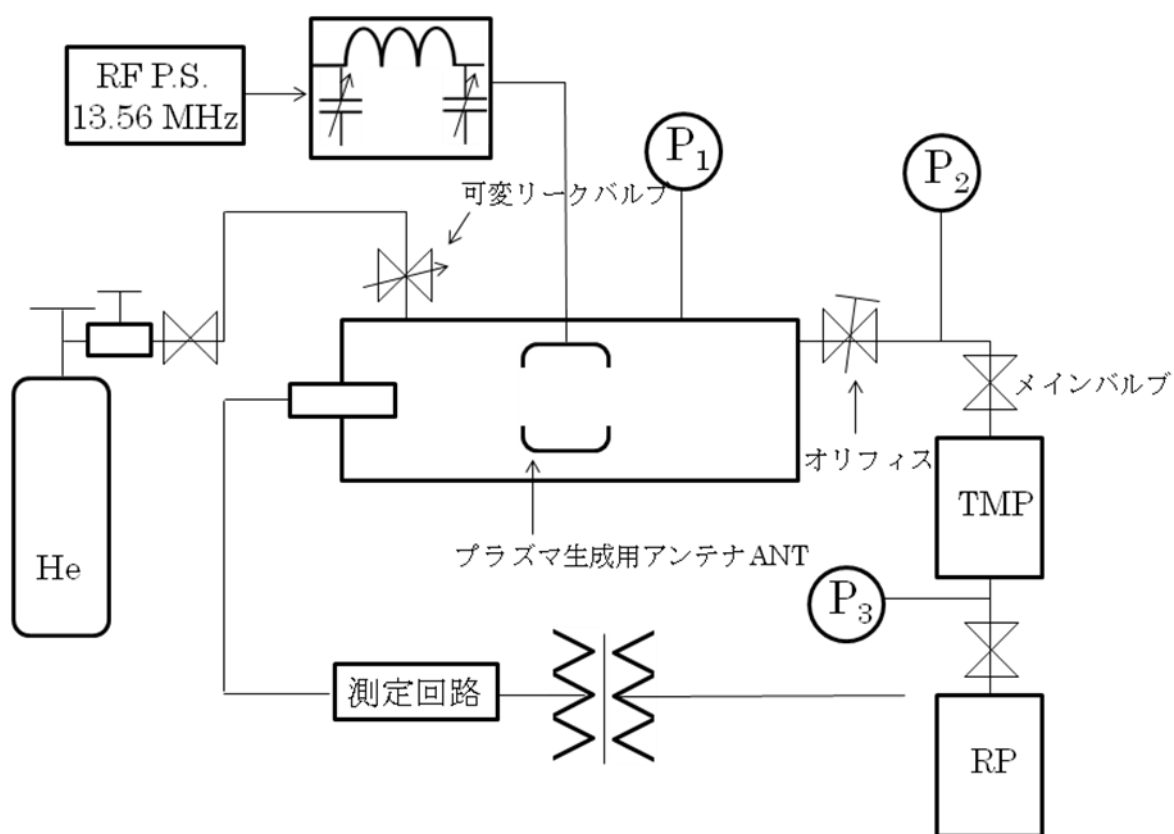


Fig. 3-2. CPX-1 における真空計の配置

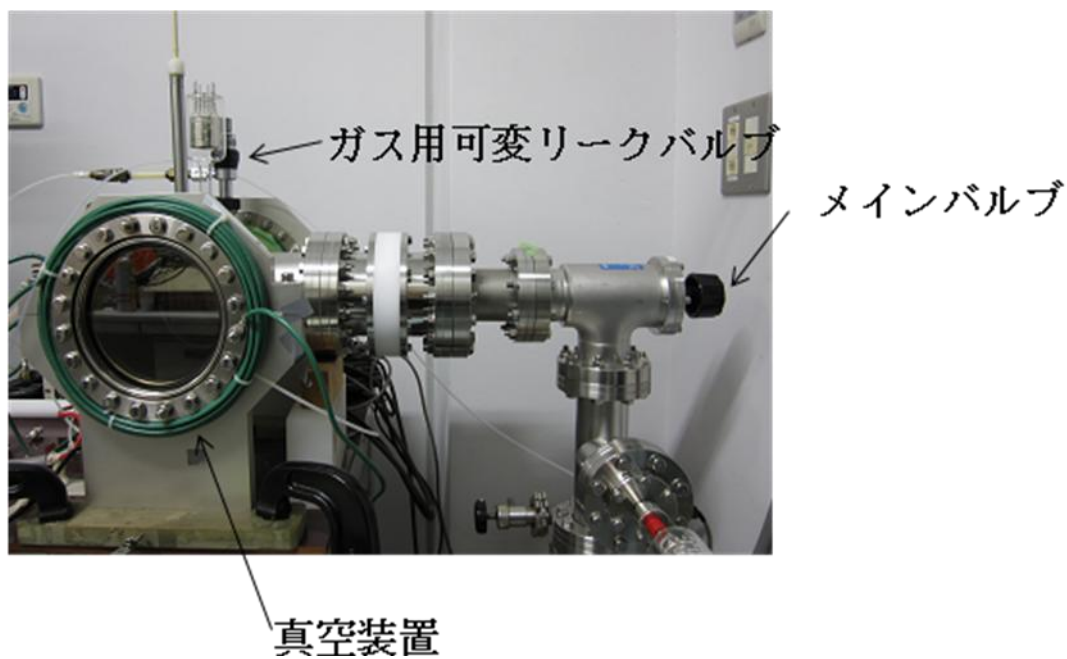


Fig. 3-3. CPX-1 における真空計の配置(上半分)

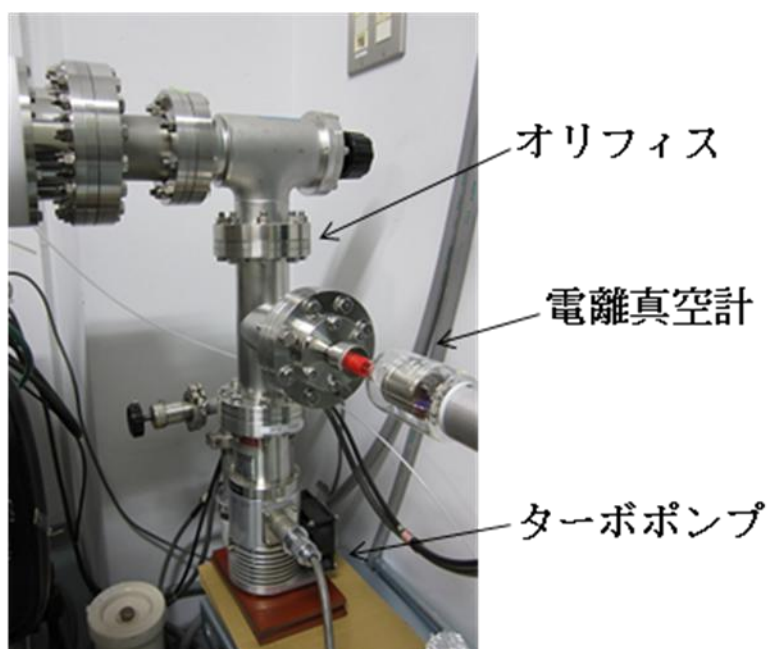


Fig. 3-4. CPX-1 における真空計の配置(下半分)

我々はイオンによる熱量を計測したいので、高周波 on と同時にプラズマが生成しなければならない。そのような状況にするにはガス圧力を上げなければならない。ここで問題になるのは、高周波 on とプラズマが同時発生するようなガス圧力では

電離真空系の測定可能範囲を超えてしまっている。そのためオリフィスを真空内部に装着することにより実験的に較正を行い、ガス圧力を算出した。

-電離真空計-

電離真空計の原理を紹介する。陽極と陰極間に電圧を印加することにより電子電流を加速させ、中性気体と衝突させる。この際に生じたイオンを、他電極を使用することによって捕まえる。そして、捕捉イオン電流は中性気体の密度に比例するので、圧力を知ることが出来る。本真空計は他の真空計では必要なガスの種類が違うことによる較正を行う必要がないほど、正確な値となる。真空度は $10^{-10} \sim 10^{-3}$ Torr 程度。プラズマの実験においてよく使用される。[2.8]

-オリフィスと中間領域-

中性気体の流れは粘性流、中間領域、分子流の三種類ある。

管壁と気体分子の衝突が気体分子同士の衝突に対して十分少ない際は中性気体を連続と見なすことが出来る。すなわち $\phi \gg \lambda$ (ϕ :導管の直径, λ :平均自由行程)の状態。この流れを粘性流という。

対して、管壁と気体分子の衝突が気体分子同士の衝突に対して十分大きい際の流れを分子流という。($\phi \ll \lambda$)

上のどちらでもない際の流れは中間領域である。

また、分子流および粘性流の流量は以下の通り。[3.1]

(α :補正係数、 $v_{average}$:平均速度、 S :導管の断面積、 L :導管の周囲の長さ、 l :導管の長さ、 η :粘性係数、 r :導管の半径)

$$\text{分子流: } Q = \frac{4}{3} \alpha v_{average} \frac{S^2}{Ll} (p_1 - p_0) \quad \text{コンダクタンス: } C = \frac{4}{3} \alpha v_{average} \frac{S^2}{Ll}$$

$$\text{粘性流: } Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \frac{p_0 + p_1}{2} (p_1 - p_0) \quad \text{コンダクタンス: } C = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \frac{p_0 + p_1}{2}$$

しかし、中間領域ではコンダクタンスを求める式は適用できない。そのため、実験

によって較正し、ガス圧力を求めた。この結果を(Fig. 3-5.)に示す。

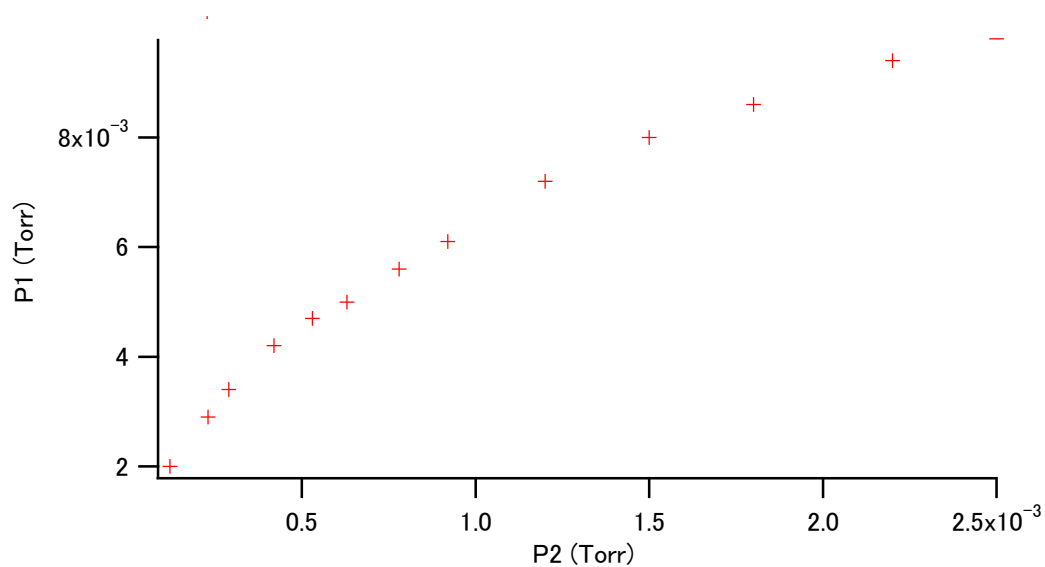


Fig. 3-5. 圧力較正の実験結果

-プラズマ signal 用の回路について-

プラズマ電流およびバイアス電圧、温度上昇を計測するための回路を(Fig. 3-6.) および(Fig. 3-7.)に示す。

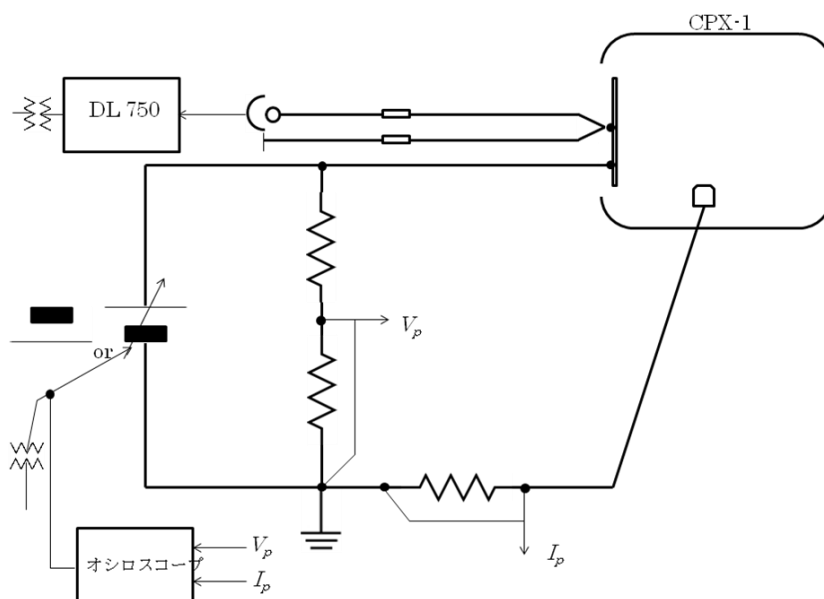


Fig. 3-6. プラズマ signal 用の回路図

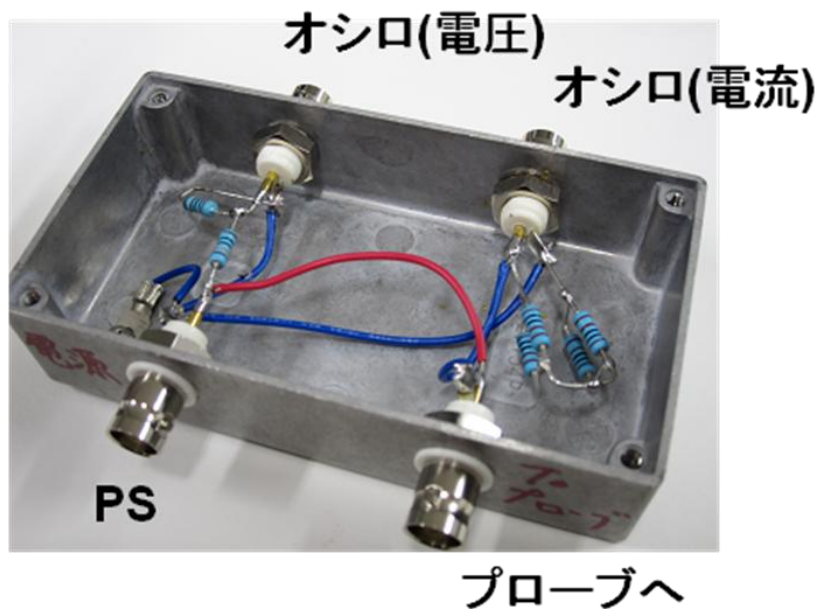


Fig. 3-7. 電圧および電流を計測するための回路

3.2 RT-1 について

RT-1 における実験も基本的に CPX-1 と同じ配列で行っている。

第4章 実験結果と考察

4.1 CPX-1 における予備実験

RT-1 装置は高温超電導マグネットを使用しており、その冷却や劣化など様々な問題で頻繁に実験をすることが出来ない(2 カ月に一度程度)。また、数十 keV にも達する高温電子など普通のプラズマでないため、サーマルプローブを直接 RT-1 にもっていてもデータをとれる保証がない。以上の理由から RT-1 装置の前段階としての位置づけで、予備実験を CPX-1 装置で行うことにした。

4.1.1 動作実験

動作実験として、サーマルプローブが正しく機能するのか調査した。詳しく言及すると、捕集面の温度上昇から熱量を見積もれるのか？またバイアス電圧の変化によって熱量が正しく変化するなどを調査した。

-熱量の見積もり-

捕集面の温度上昇から流入熱量を見積もるため、非常にシンプルな model1 を適用した。

$$\frac{d}{dt}(\Delta T) = \frac{Q_{in}}{mc} - \frac{\Delta T}{\tau} \quad -(4-1)$$

t : 経過時間(sec)

ΔT : 温度上昇

Q_{in} : 流入熱量(W)

m : 捕集面の質量(kg)

c :比熱($J/kg \cdot K$)

τ :時定数(sec)

(4-1)式の第一項はプラズマによる流入熱量の項、第二項は捕集面に接触するセラミックスなど構造物から熱が逃げてしまうことを考えた項である。その概略図を(Fig. 4-1.)に示す。

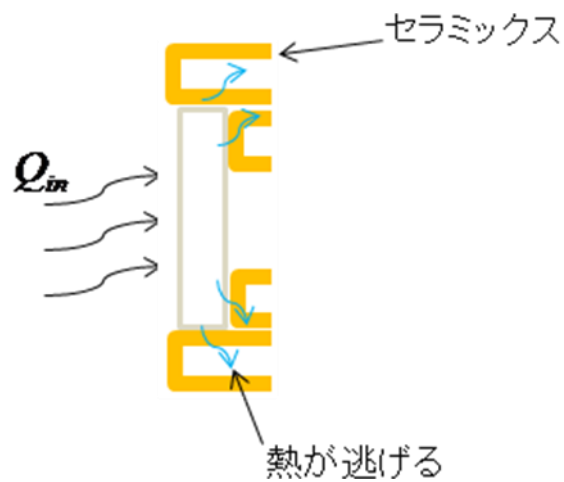


Fig. 4-1. サーマルプローブの先端部分

-プローブ電流 I_p -t、温度上昇 ΔT -t について-

次に、実験におけるプローブ電流 I_p (A)-t 特性を(Fig. 4-2.)および温度上昇 ΔT -t 特性を (Fig. 4-3.)に示す。(バイアス電圧 $V_p=-100$ V, Power=200 W, Gas He)

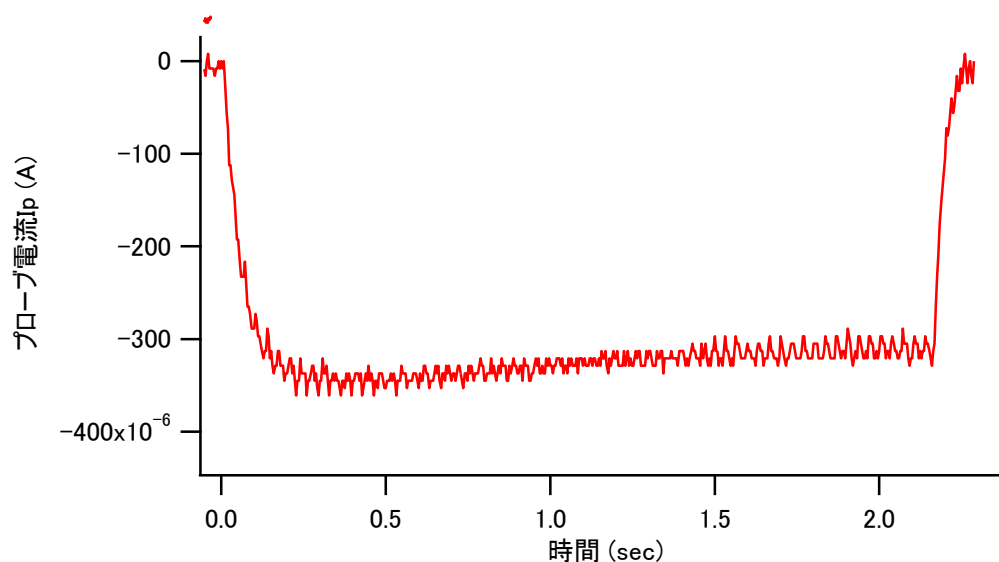


Fig. 4-2. CPX-1 におけるプローブ電流 I_p -t 特性

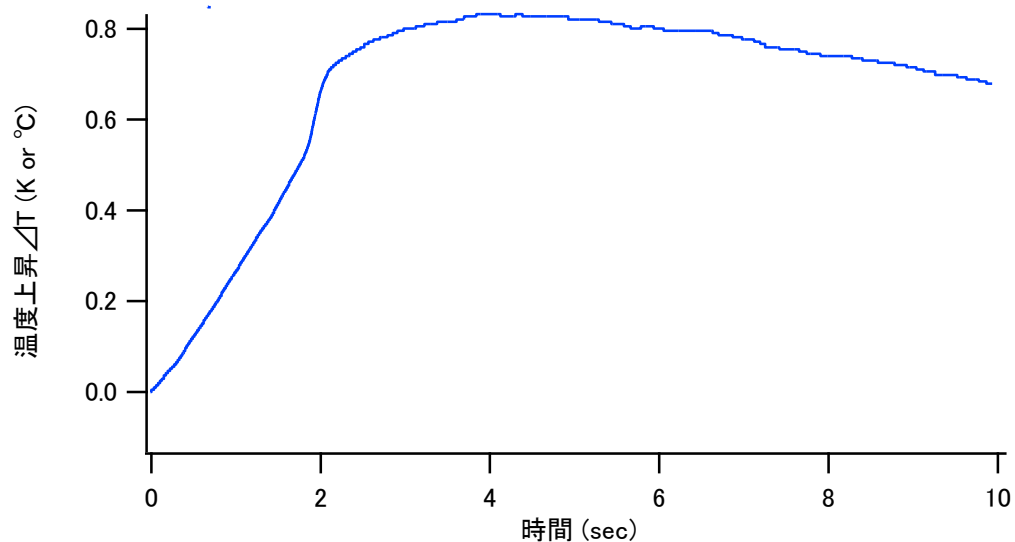


Fig. 4-3. CPX-1 における温度上昇 ΔT -t 特性

上の結果について考察してみる。普通であればプラズマ電流が通電している時間と

温度上昇がピークになる時間が等しくなければいけない。しかし、

プラズマ電流通電時間 → 2.236 (sec)

温度上昇ピーク時間 → 3.864

と 1 (sec)以上の差がある。これは、捕集面を 0.1 (mm)とハード面で可能な限り薄くしたのに関わらず、プラズマ受熱部分と熱電対が装着してある計測部分で温度に差があることを意味する。すなわち温度非平衡を意味する。

さらにこの事実を掘り下げるためにプラズマ off 後の時定数 τ を調査した。

-プラズマ off 後の時定数 τ -t について-

プラズマ off 後の時定数 τ -t 特性を(Fig. 4-4.)に示す。

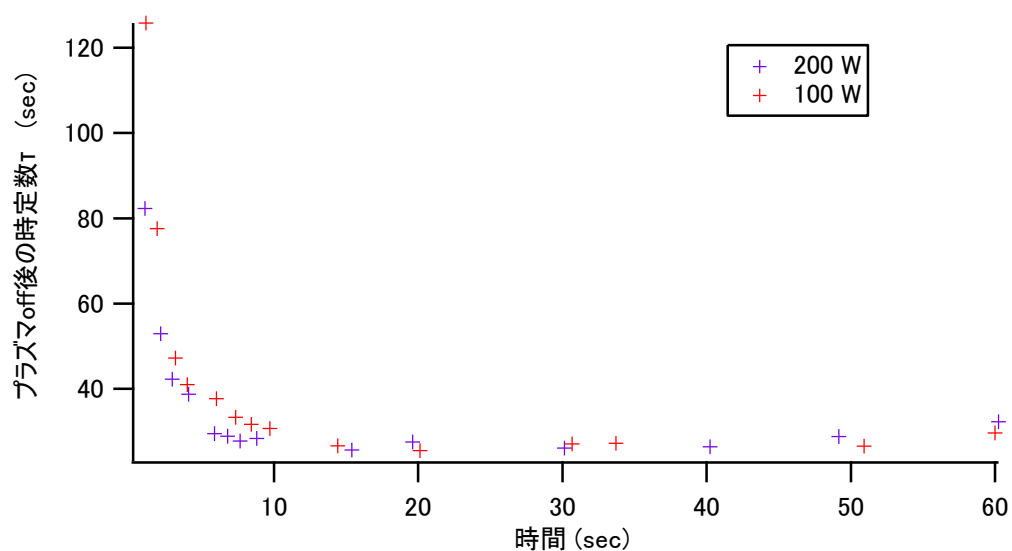


Fig. 4-4. CPX-1 における時定数 τ -t 特性

RFpower=200 W, 100 W 共に約 15 sec 以降に時定数が一定となっている。

これが意味するのは、15 sec 以上の放電が可能なプラズマにおいては受熱部と計測部の温度平衡が成り立ち model1 を利用して熱量を見積もれることを示唆している。

4.1.2 温度平衡時における実験結果

4.1.2.1 model1 の適用と検証

4.1.1 で 15 (sec)以上の放電では受熱部と計測部は温度平衡であり model1 が適用できることを述べた。その事実を確実にするために、20 (sec)放電において、先と同様にプラズマ電流通電時間と温度上昇がピークになる時間が等しいか調査した。以下に(Fig. 4-5.)および(Fig. 4-6.)を示す。

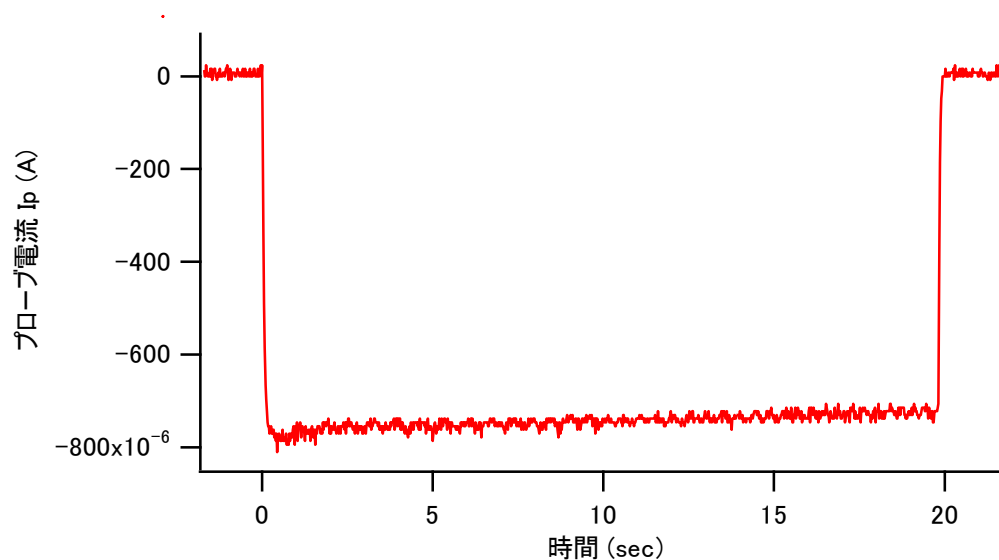


Fig. 4-5. 20 sec 放電における I_p -t 特性

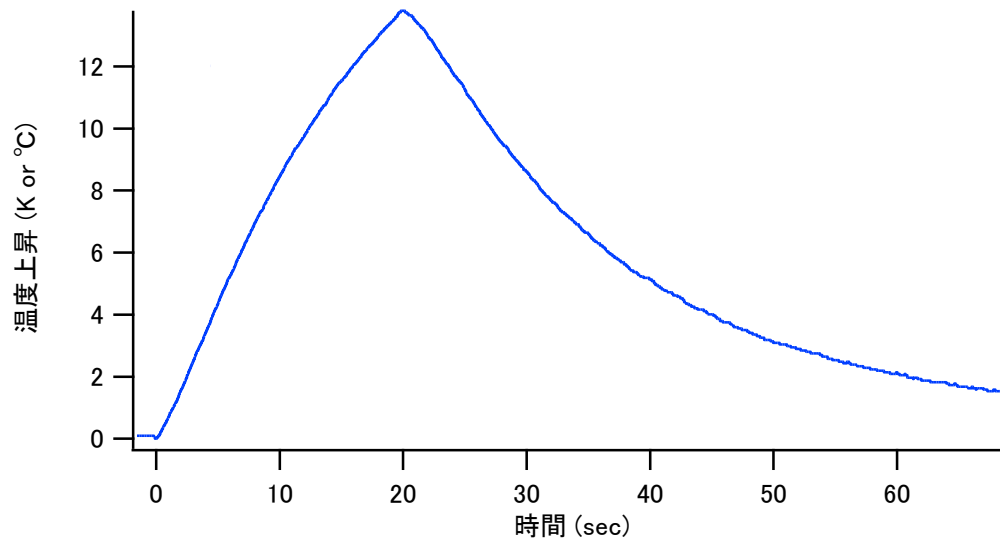


Fig. 4-6. 20 sec 放電における $\Delta T/t$ 特性

プラズマ電流通電時間 → 19.94 sec

温度上昇ピーク時間 → 19.85

以上よりプラズマ電流通電時間≒温度上昇ピーク時間が成り立つ。

よって、20 sec 放電では受熱部と計測部は温度平衡であり model1 を利用することに熱量を見積もれそうである。

-model1 の検証-

上記の説明で放電時間 20 sec 程度で model1 を適用できる可能性を述べた。

ここで、本当に実験値と model1 がマッチしているのかを検証する。

model1 を適用して熱量を見積もってみる。model1 の微分方程式を解いた結果が (4-2)式である。

$$Q_{in} = \frac{mc\Delta T}{\tau \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right) \right\}} \quad \text{-(4-2)}$$

(4-2)式＝理論値と実験値を比較したものを(Fig. 4-7.)に示す。

Fig より実験値と理論値がほぼマッチしており、model1 を用いて熱量を見積もれると判断出来る。

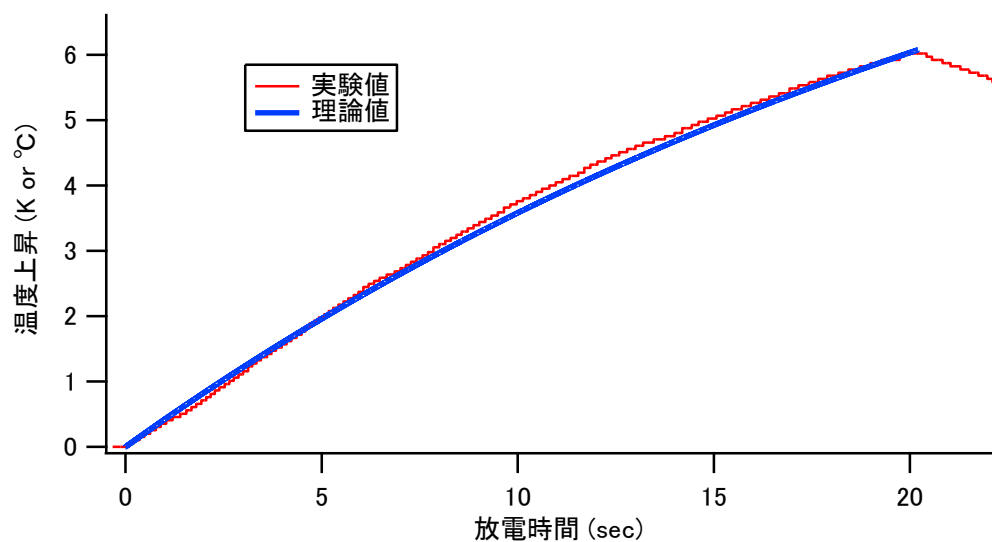


Fig. 4-7. CPX-1 における温度上昇-放電時間特性

-バイアス電圧を変化させた際の熱量-

各バイアス電圧に対する温度上昇、時定数、放電時間から熱量を算出する。

・ case1

プラズマ生成条件 Power= 100 (W), Gas Pressure= 13 (mTorr)

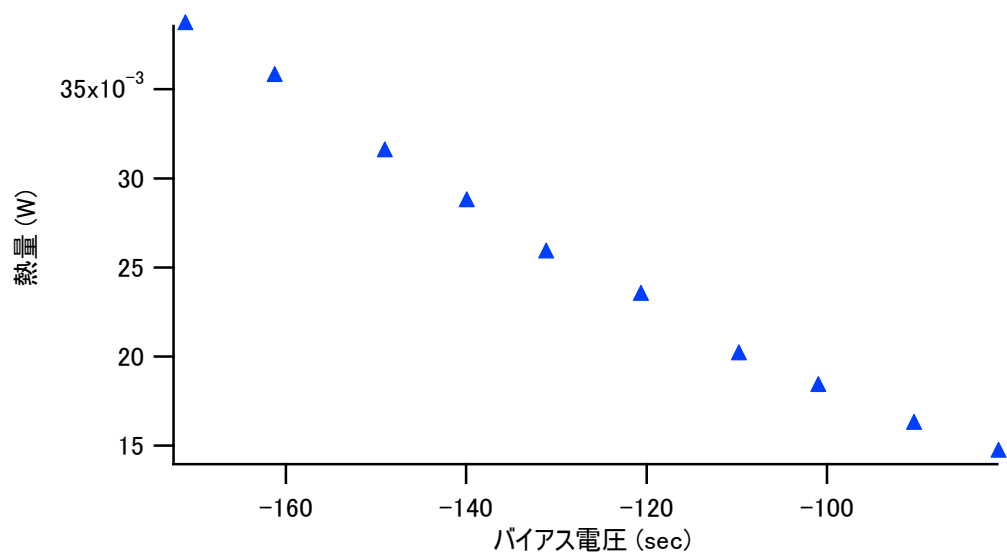


Fig. 4-8. CPX-1 における熱量-バイアス電圧特性(Power=100 W)

• case2

プラズマ生成条件 Power= 250 (W), Gas Pressure= 10 (mTorr)

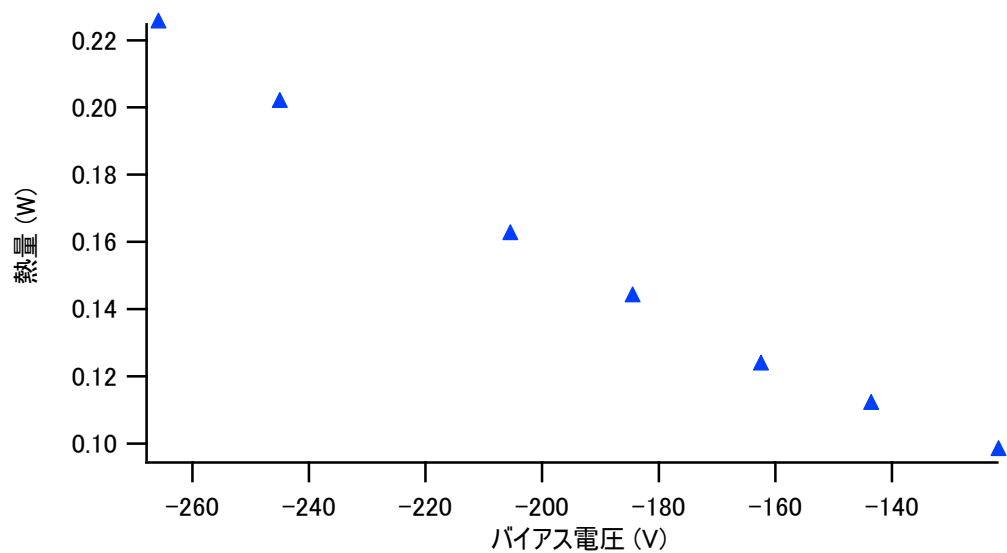


Fig. 4-9. CPX-1 における熱量-バイアス電圧特性(Power=250 W)

case1,case2 両ケース共にバイアス電圧を印加してイオンを引き込むように作用すればするほど熱量が増加し、きれいな特性が出ている。

4.1.2.2 イオン温度の導出

今回採用した(2-10)式を利用して見積もった熱量からイオン温度を導出する。
(2-10)式をフィッティングしやすいように展開すると(4-3)式となる。

$$\frac{Q_{in}}{I} - (\varepsilon - W) = -(1 - cR)V_p + (1 - cR)(2T_i + V_s) \quad -(4-3)$$

4.1.2.1 の case1、case2 について①式の左辺を縦軸、 V_p を横軸にとったのが(Fig. 4-10.) (Fig. 4-11.)である。

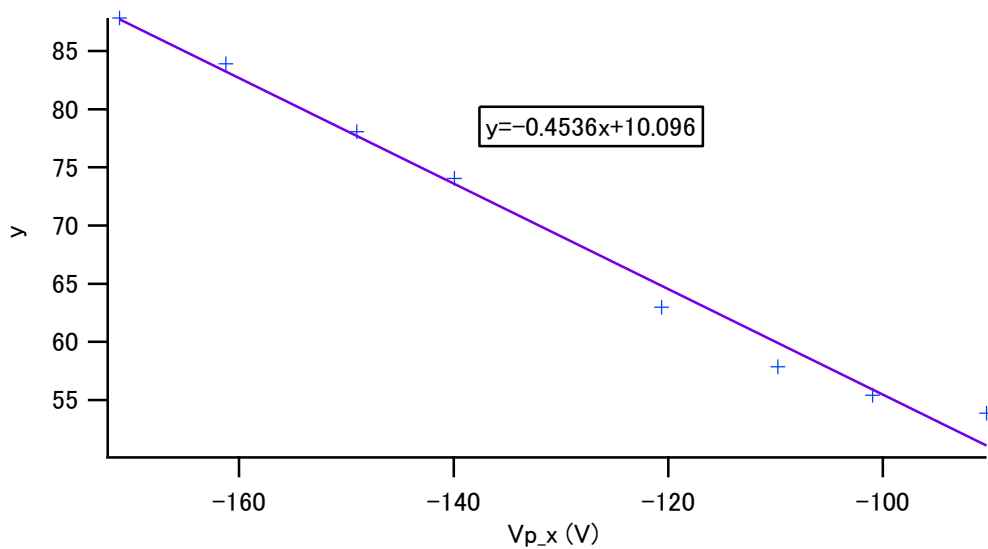


Fig. 4-10. イオン温度導出のためのフィッティングの式

よって、 $(1 - cR) = 0.4536$, $2T_i + V_s = 10.096$

この場合 $V_s = 21.4$ (V)であり、イオン温度 $T_i = 0.6 \pm 3.6$ (eV) となった。

イオン温度のエラーバーは熱量のばらつきから求めている。

case2

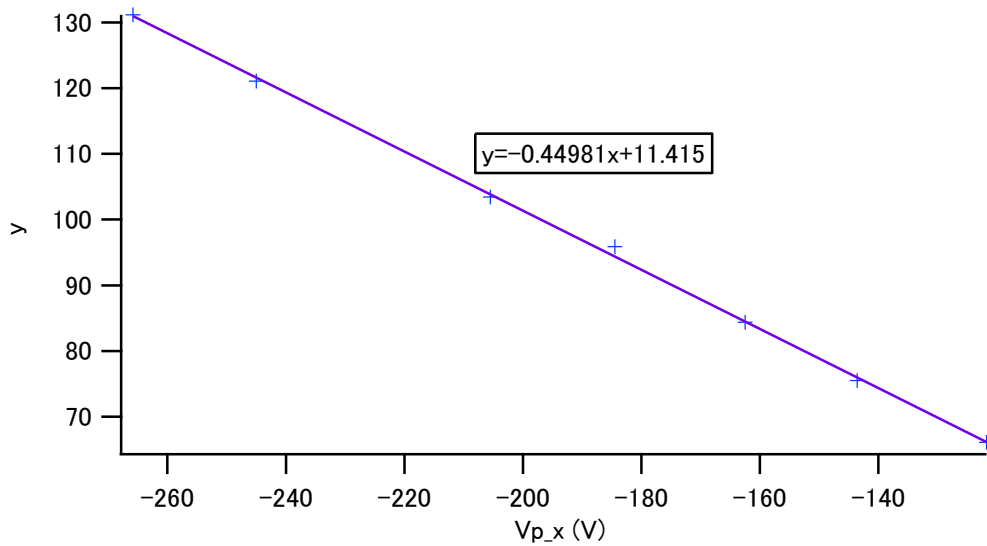


Fig. 4-11. イオン温度導出のためのフィッティングの式

よって、 $(1-cR)=0.44981$, $2T_i+V_s=11.415$

この場合 $V_s=23.9$ (V)であり、イオン温度 $T_i=0.5\pm1.0$ (eV) となった。

イオン温度のエラーバーは熱量のばらつきから求めている。

通常エネルギー反射率は $\Phi=V_p\cdot V_s$ に依存するが、今回は依存を考えていない。その理由は以下である。

- ① バイアスを大きく印加すると飽和するから(一定になる)
- ② フィッティングの式とバイアス電圧の特性が直線と判断出来るから(Fig.4-10.)
および(Fig.4-11.)から

4.1.3 温度非平衡時における実験結果

4.1.3.1 model2 の適用と検証

15 (sec)を超える放電については温度平衡のため model1 を利用でき、イオン温度を導出することが出来た(4.1.2)。しかし、我々が目標にしているのは RT-1 における計測であり、その動作放電の 1, 2 (sec)放電での計測が必須である。そこで、受熱部と計測部それぞれについての熱現象を考慮した model2 を考えた。

-model2 について-

受熱部及び計測部の概略図を(Fig. 4-12.)に示す。

そして、これを受熱部と計測部にわけた概略図を(Fig. 4-12')に示す。

受熱部：プラズマによる熱量 Q が流入する。そして、この熱量が受熱部から温度計測部に移動する。また同時にセラミックスから熱が逃げる(この時定数を τ_1 とする)。

計測部：受熱部からの熱を受ける。そして、同時にバイアス線や熱電対から熱が逃げてしまう(この時定数を τ_2 とする)。

以上を考慮するとプラズマ on、プラズマ off 時に以下の式が成立する。

プラズマ on :

$$\text{受熱部} \quad \frac{d}{dt}(\Delta T_1) = \frac{Q_m - \left(-\lambda \frac{T_m - T_1}{x_m - x_1} S \right)}{m_1 c} - \frac{\Delta T_1}{\tau_1} \quad -(4-4)$$

$$\text{計測部} \quad \frac{d}{dt}(\Delta T_m) = \frac{-\lambda \frac{T_m - T_1}{x_m - x_1} S}{m_1 c} - \frac{\Delta T_m}{\tau_2} \quad -(4-5)$$

プラズマ off :

$$\text{受熱部} \quad \frac{d}{dt}(\Delta T_1) = \frac{-\left(-\lambda \frac{T_m - T_1}{x_m - x_1} S\right)}{m_1 c} - \frac{\Delta T_1}{\tau_1} \quad -(4-6)$$

$$\text{計測部} \quad \frac{d}{dt}(\Delta T_m) = \frac{-\lambda \frac{T_m - T_1}{x_m - x_1} S}{m_1 c} - \frac{\Delta T_m}{\tau_2} \quad -(4-7)$$

ΔT_1 : 受熱部の温度上昇(Kor°C)

ΔT_m : 計測部の温度上昇(Kor°C)

λ : 熱伝導率(W / m · K)

S : 受熱部と計測部の接触面積(m²)

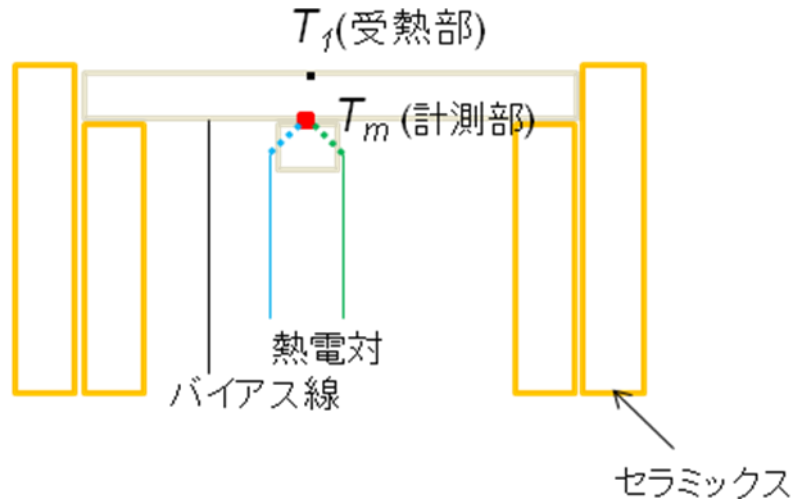


Fig. 4-12. プローブ先端部

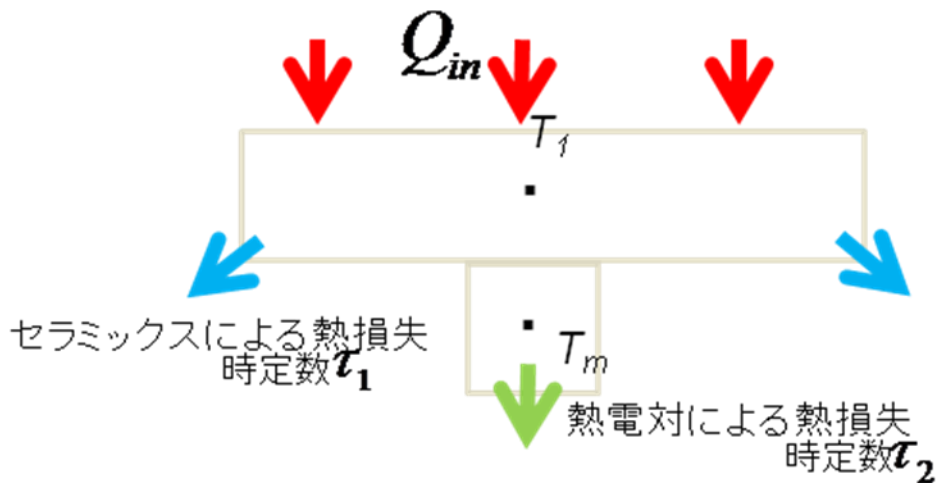


Fig. 4-12'. プローブ先端部の受熱部および計測部

-model2 の検証-

model1 と同様、model2 についても実験値と理論値がマッチしているのか検証した。放電時間 2sec における温度上昇-放電時間特性の実験値および理論値の関係を (Fig. 4-13.) に示す。

実験値と理論値がほぼマッチしており、model2 を適用して熱量を見積もれることが確認できた。

* プラズマ off 後に温度上昇があるのは受熱部と計測部に温度差があるから

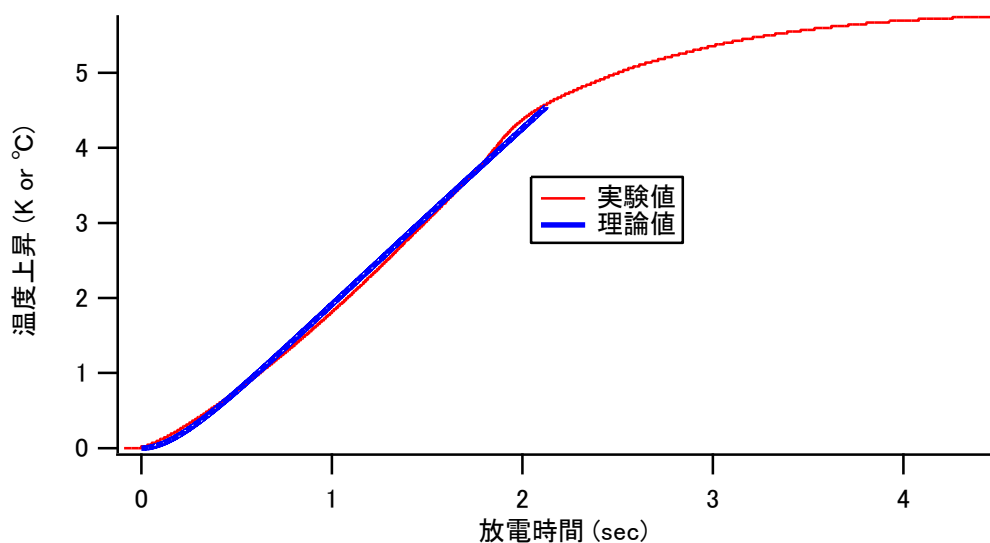


Fig. 4-13. CPX-1 における温度上昇-放電時間特性

-バイアス電圧を変化させた際の熱量-

バイアス電圧と model2 から見積もった熱量の関係を(Fig. 4-14.)に示す。バイアス電圧に依存した熱量結果を求めることが出来た。

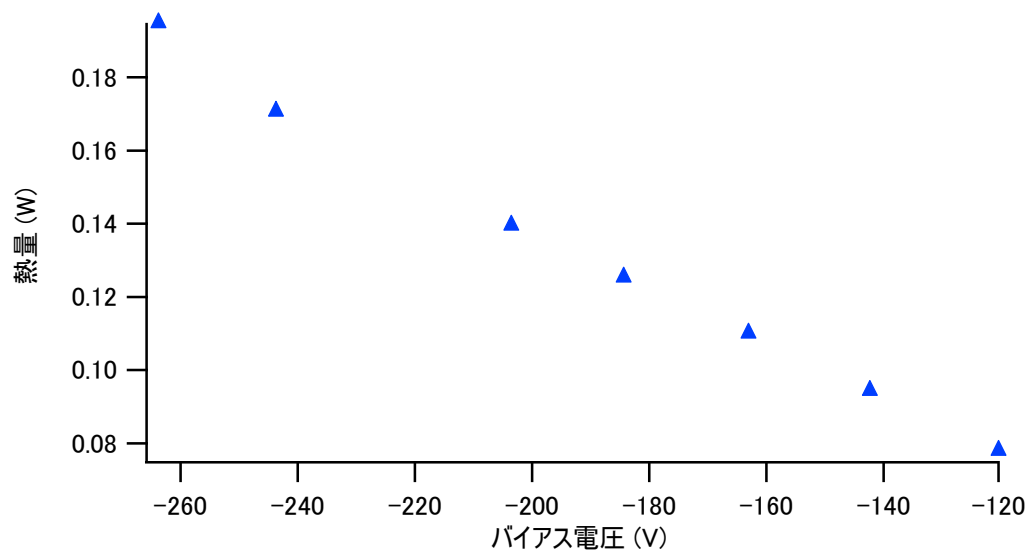


Fig. 4-14. CPX-1 における熱量・バイアス電圧特性

4.1.3.2 イオン温度の導出(温度非平衡における)

4.1.3.1 の結果より(4-3)式を用いてイオン温度を導出する。(4-3)式の左辺とバイアス電圧の関係を(Fig. 4-15.)に示す。

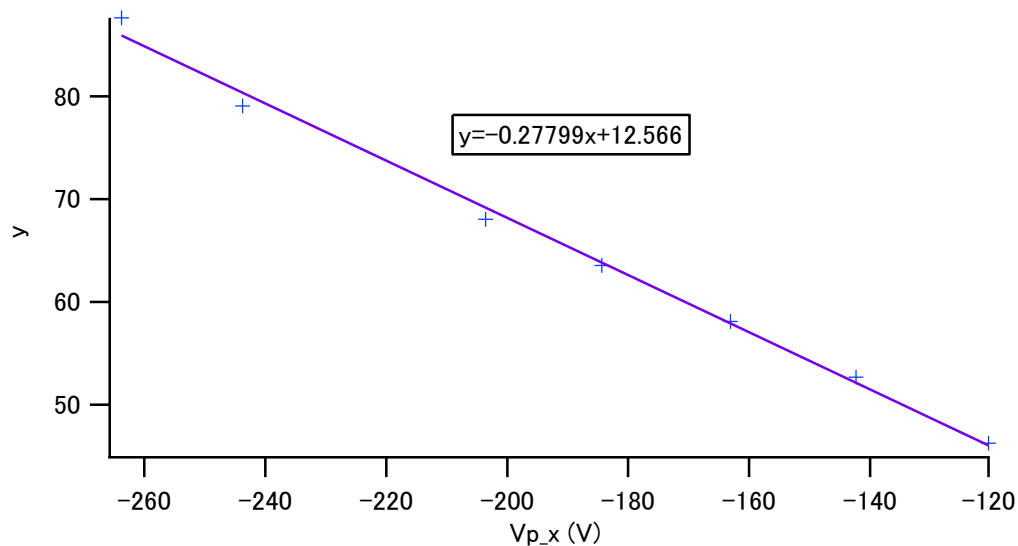


Fig. 4-15. イオン温度導出のためのフィッティングの式

よって、 $(1-cR)=0.27799$, $2T_i+V_s=12.566$

この場合 $V_s=35.0$ (V)であり、イオン温度 $T_i=5.2\pm 3.8$ (eV) となった。

イオン温度のエラーバーは熱量のばらつきから求めている。

4.2 RT-1 における実験

CPX-1 における予備実験より、温度非平衡状態でもイオン温度を導出出来ることがわかったので RT-1 で実験を行った。

この際、数十(keV)に達する電子温度の影響でイオンを引いても電子が入ってくる可能性があるため高エネルギー電子がいらないと思われる、低ガス圧かつ低 power で実験を行った。

• case1

プラズマ生成条件→高周波マグネトロン 2.45 (GHz), 放電時間 1 (sec),
Power=2(kW), GasPressure= 5.0×10^{-3} (Pa), 計測位置 $R=1000$ (mm)

熱量-バイアス電圧特性を(Fig. 4-16.)にフィッティングの式を(Fig. 4-17.)に示す。

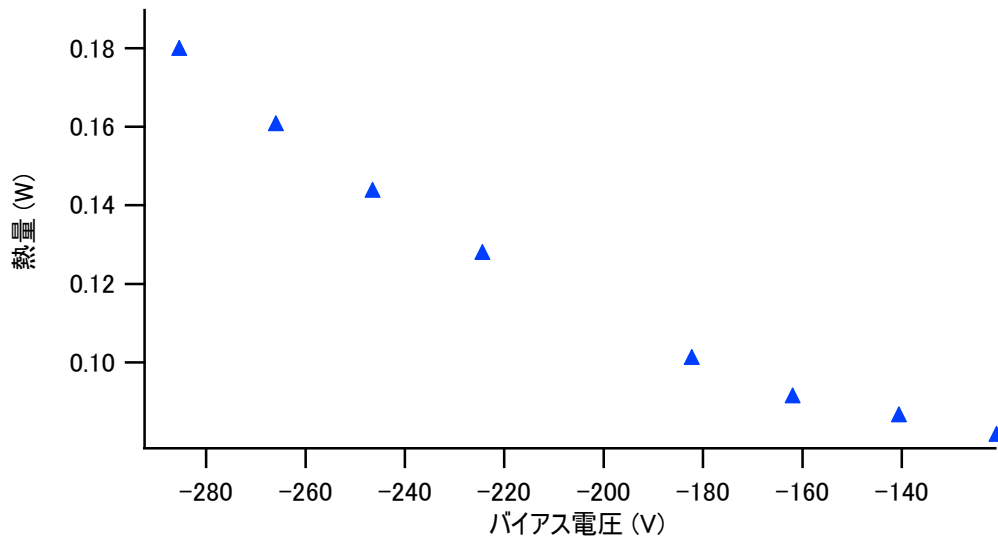


Fig. 4-16. RT-1 における熱量-バイアス電圧特性($R=1000$ mm)

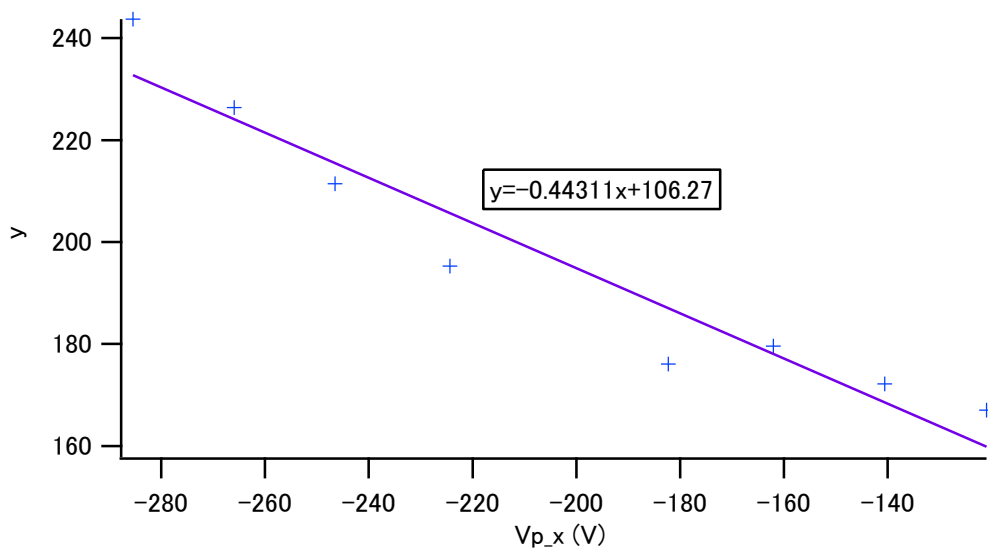


Fig. 4-17. RT-1 におけるフィッティングの式($R=1000$ mm)

よって、 $(1-cR)=0.44311$, $2T_i+V_s=106.27$

この場合 $V_s=23(\text{V})$ であり、イオン温度 $T_i=125 \pm 14(\text{eV})$ となった。

また $cR=0.56$ である。

• case2

プラズマ生成条件→高周波マグネトロン 2.45 (GHz), 放電時間 1 (sec),

Power=2(kW), GasPressure= 5.0×10^{-3} (Pa), 計測位置 $R=900$ (mm)

熱量-バイアス電圧特性を(Fig. 4-18.)にフィッティングの式を(Fig. 4-19.)に示す。

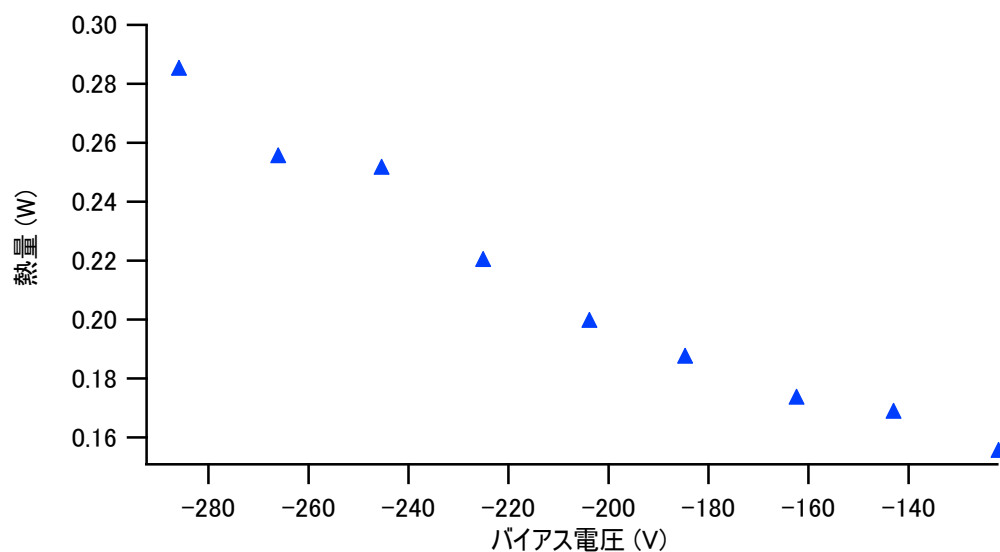


Fig. 4-18. RT-1 における熱量-バイアス電圧特性

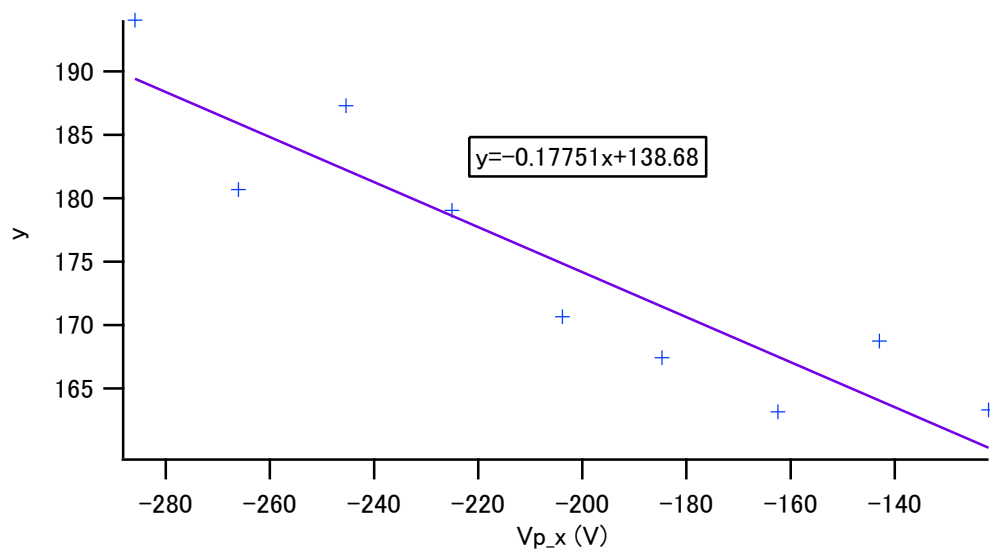


Fig. 4-19. RT-1 におけるフィッティングの式

よって、 $(1-cR)=0.17751$, $2T_i+V_s=138.68$

この場合 $V_s=25(\text{V})$ であり、イオン温度 $T_i=393 \pm 86 (\text{eV})$ となった。

また $cR=0.82$ である。

• case3

プラズマ生成条件→高周波マグネトロン 2.45 (GHz), 放電時間 1 (sec),

Power=2(kW), GasPressure= 5.0×10^{-3} (Pa), 計測位置 $R=850$ (mm)

熱量-バイアス電圧特性を(Fig. 4-20.)にフィッティングの式を(Fig. 4-21.)に示す。

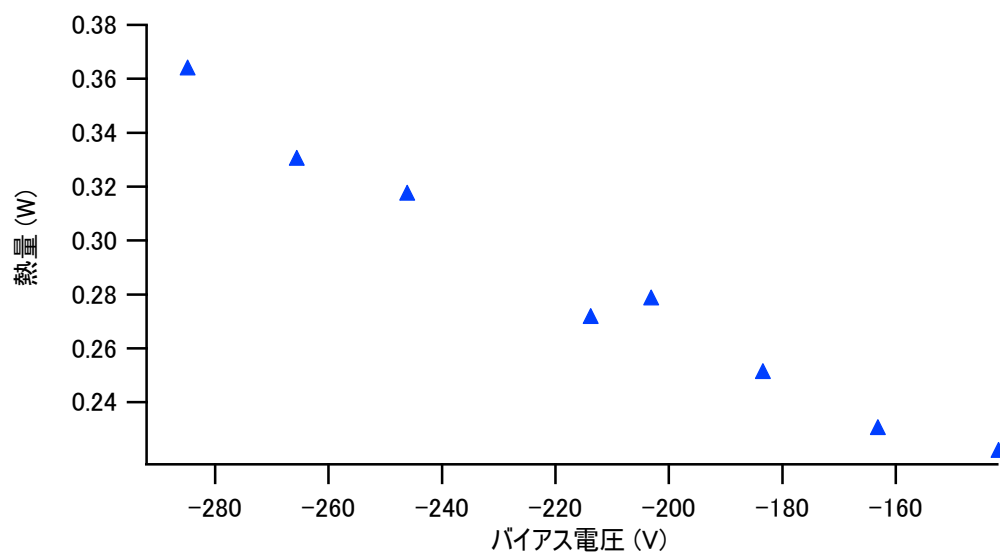


Fig. 4-20. RT-1 における熱量-バイアス電圧特性

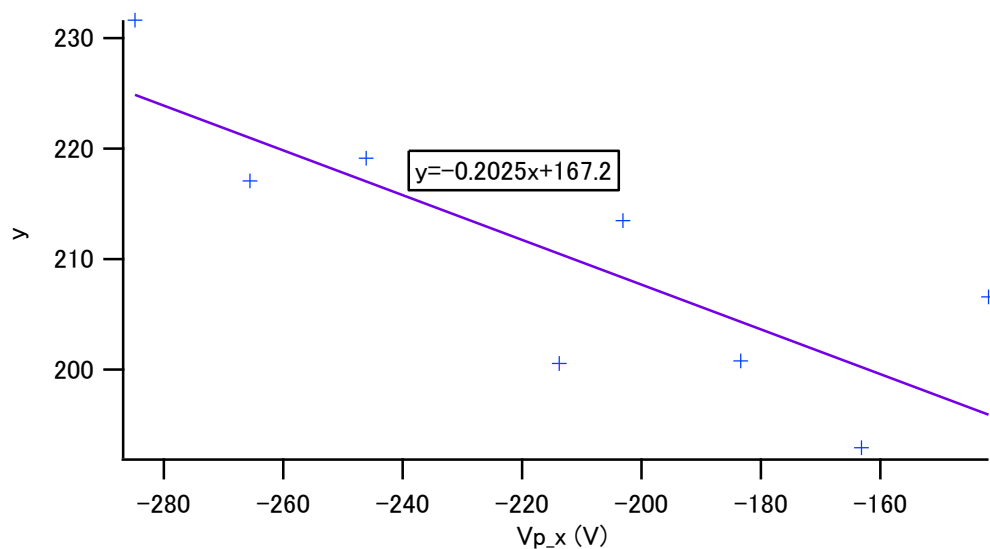


Fig. 4-21. RT-1 におけるフィッティングの式

よって、 $(1-cR)=0.2025$, $2T_i+V_s=167.2$

この場合 $V_s=27(\text{V})$ であり、イオン温度 $T_i=449\pm 168(\text{eV})$ となった。

また $cR=0.80$ である。

4.3 考察

RT-1 エッジにおけるイオン温度を計測するための一連の過程として以下の三つを行った。

1. 長時間放電(15sec ~)での温度平衡状態における計測 CPX-1 にて
2. 短パルス放電(1 ~2 sec)での温度非平衡状態における計測 CPX-1 にて
3. 短パルス放電(1 ~2 sec)での温度非平衡状態における計測 RT-1 にて

それぞれについての考察を行う。

-温度平衡状態における計測(CPX-1)-

2cases における実験結果を 4.1.2 に示した。いずれの場合も $Q\cdot V_p$ 特性がきれいに
出ており、最終目標であるイオン温度 T_i は以下ようになった。

- case1 $T_i=0.6\pm 3.6 \text{ eV}$
- case2 $T_i=0.5\pm 1.0 \text{ eV}$

CPX-1 のプラズマパラメータとして電子温度 T_e は一桁 eV であり、一般にイオン
温度 T_i は電子温度 T_e の 10 分の 1 であることから正しい結果となった。

エラーバーが本値より大きい理由は熱量がばらついているためである。その原因は
15 sec を超える長時間放電では微妙にプラズマパラメータが変化することが挙げ
られる。他のプラズマ計測においては、その変化は無視できるが、サーマルプロー
ブは熱的に計測し、なおかつ対象としているイオン温度 T_i は低いのでこの変化が
とても重要である。そのため実験中は細心の注意を払いプラズマを観察し、同一の
プラズマパラメータであることを逐一確認した。

小数点第 1 位程度のイオン温度 T_i を対象としているので成功したといえる。

-温度非平衡状態における計測(CPX-1)-

実験結果を 4.1.3 に示した。 $Q-V_p$ 特性がきれいに出ており、最終目標であるイオン温度 T_i は以下ようになった。

- $T_i = 5.2 \pm 3.8 \text{ eV}$

イオン温度 T_i は小数点第一位 eV であるプラズマにおいて本結果はやや見積もりが大きい。その理由として考えられるのが 2 sec 放電と短パルス放電であるためプラズマが定常状態でないことが考えられる。CPX-1 におけるプラズマ生成の Power は最大で 270 (W) である。一方 RT-1 では数 (kW) と高 Power であるため、短パルス放電でも定常状態を考えて良い。よって、この結果は RT-1 における計測が可能であることを示している。

-温度非平衡状態における計測(RT-1)-

RT-1 中心からの距離が異なる 3cases 実験結果を 4.2 に示した。いずれの場合も $Q-V_p$ 特性はまずまずのものが描けた。しかし、この結果をイオン温度にすると 100 eV を超えてしまう結果となっている。この原因として考えられるのは高エネルギー電子の存在である。理論上はシースの作用によってイオンのみをプローブに引き電子をはねかえしている。しかし、高エネルギー電子はこのはねかえすように作用する力以上のエネルギーをもってプローブに入ってきている可能性がある。その結果、見積もった熱量がイオンと電子によるもので、イオンの作用だけ考えた(2-10)式では見積もりが大きくなってしまったと考えられる。

ここで高エネルギー電子による流入熱量をおおまかに見積もってみる。
高エネルギー電子は高 $\beta = 40 \%$ 時にコイル中心で最大 50 (keV) にも達する。今回の実験は、出来るだけ高エネルギー電子を排除するため、コイルを着地させ、かつ低

Power でプラズマを生成したので高エネルギー電子は 1 (keV)にも満たないと思われる。そこでエッジにおける温度を 0.1 (keV)と仮定する。また、電子温度は計測によって内部で 10^{16} (/m³)オーダーであることがわかっている。よって、エッジでの密度を 10^{15} (個/m³)と仮定する。

その際に、プローブに流入するであろう熱量は以下のように考えられる。

$$Q_e = n_e \times v \times S \times eT_e = 0.76[W] \quad (4-9)$$

の熱量が流入する。

流入熱量とイオン温度の関係を示した(2-10)式は、高エネルギー電子の熱量 Q_e を考慮して(4-8)式のように書くことが出来る。

$$Q_{in} = I_i \{ (2T_i - \phi)(1 - cR) + (\varepsilon - W) \} + Q_e \quad (4-8)$$

(4-8)式を用いて case2 のフィッティングを行うと、 $(1 - cR) = 0.36034$, $2T_i + V_s = 99.38$ となり $V_s = 25$ (V)であるから、イオン温度 $T_i = 37$ (eV)、 $Q_e = 0.072$ (W) となった。

(4-8)式から見積もった Q_e は、仮定の値の 10 %ほどである。

イオン温度は依然として高い。その理由として(4-8)式が完全に高エネルギー電子の影響を考慮した式と言えない可能性が考えられる。

続いて、同時測定しているファラデーカップの RT-1 境界部におけるイオン温度 $T_i \approx$ 約 1 eV を正しいと仮定して case1 ~case3 の高エネルギー電子による熱量を見積もったのが以下である。

- case1 $Q_e = 0.0325$ (W)
- case2 $Q_e = 0.0905$ (W)
- case3 $Q_e = 0.125$ (W)

また、上の高エネルギー電子の熱量 Q_e と RT-1 中心軸からの距離の関係を表したのが(Fig. 4-22.)である。

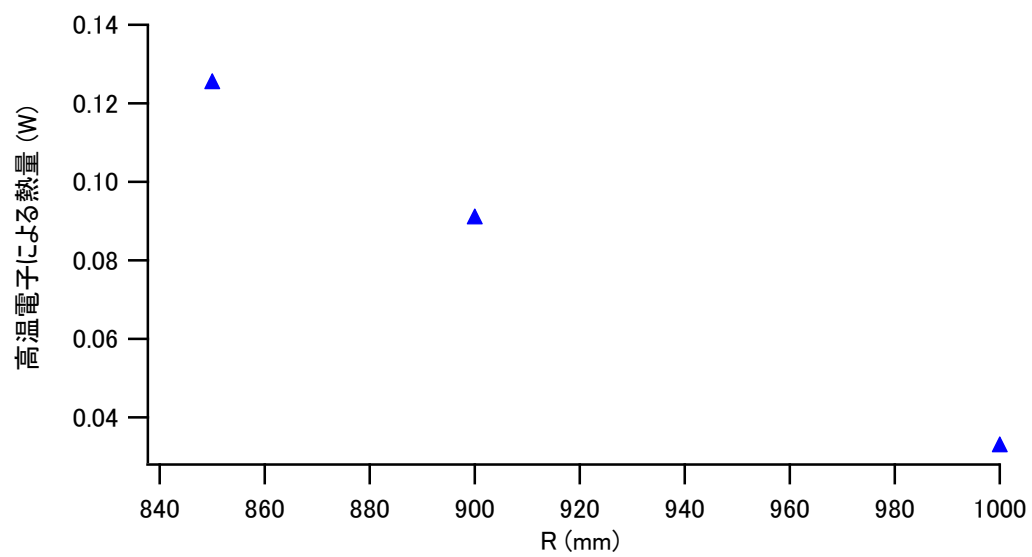


Fig. 4-22. 高温電子による熱量と RT-1 中心軸からの距離の関係

RT-1 中心に近ければ近いほど高エネルギー電子が増していることもわかる。

第5章 結論

最終目標である RT-1 エッジにおけるイオン温度を計測するために、サーマルプローブを自作設計し、それに至る見積もり、そして動作実験を行った。

熱量の見積もりから 1 点計測用の構造を持つサーマルプローブで実験を行った。初期の動作試験で、プローブ厚さが 0.1 mm であるのに関わらず、プラズマ電流通電時間とプローブの温度上昇ピーク時間が異なり、プローブ表面の受熱部と計測部の温度非平衡の可能性について予期した。さらにプローブ内部の熱現象を理解するために、温度・時間特性からプラズマ off 後の時定数 τ を調査し、時間の関数となっていることをつかんだ。これから放電時間が 15 sec を超えるプラズマでは温度平衡ゆえに model1 を適用して、熱量を正確に見積もれると判断した。model1 を利用してイオン温度を求めると、 $T=0.5 \sim 0.6$ eV と正確な数値を導出することが出来、成功した。

次は、RT-1 の放電可能時間である ~ 2 sec、すなわち温度非平衡状態において熱量を見積もることが出来る model2 を適用して動作試験を行った。実験値と model2 はマッチし、正確に熱量を見積もれていると判断し、イオン温度を導出した。結果は $T=5.2 \pm 3.8$ eV とやや大きな結果となった。その理由として考えられるのは、2 sec 放電と短パルスであるためプラズマが定常状態でないことが考えられる。CPX-1 におけるプラズマ生成の Power は最大で 270 (W) である。一方 RT-1 では数 (kW) と高 Power であるため、短パルス放電でも定常状態を考えて良い。よって、この結果は RT-1 における計測が可能であることを示している。

最終目標である RT-1 でエッジのイオン温度計測を行った。結果は高エネルギー電子の影響によりイオン温度をうまく見積もることが出来なかった。しかし、高エネルギー電子の進入を防ぐことが出来れば、イオン温度を計測できる可能性を示すことが出来た。

参考文献

第 1 章

- [1.1] 核融合実験炉 ITER の進展 井上信幸+小西哲之 技術経済研究所
- [1.2] ITER HP <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/>
- [1.3] J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.9 (2006) 566-574 ELM の概要
鎌田裕, 大山直幸, 杉原正芳
- [1.4] Z. Yoshida, Y.Ogawa, J.Morikawa, et al., Plasma Fusion Res. 1, 8 (2006)
- [1.5] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, PRL 81, 4863 (1998)
- [1.6] Z. Yoshida and S. M. Mahajan, PRL 88, 095001 (2002)
- [1.7] 矢野善久 他：物理学会 2010 秋季大会 26pGY-6
- [1.8] I. Katsumata, Contrib. Plasma Phys. 36 (1996) 73
- [1.9] プラズマ診断の基礎 プラズマ・核融合学会 編
- [1.10] Journal of Plasma and Fusion Research Vol81, No7 July 2005

第 2 章

- [2.1] E. Stamate, H. Sugai and K. Ohe., Appl. Phys. Lett. 80, 3066(2002)
- [2.2] H. Matsuura et al., Contrib, Plasma Phys. 44, 677 (2004)
- [2.3] H. Matsuura et al., Contrib, Plasma Phys. 46, 406 (2006)
- [2.4] H. Matsuura and K. Michimoto, Thin solid Films 506-507, 688 (2006)
- [2.5] K. Kurihara et al., Trans. Fusion Sci. Tech. 51. 250 (2007)
- [2.6] K. Kurihara et al., Plasma Fusion Res. 2. S1082 (2007)
- [2.7] H. Matsuura, et al., Plasma and Fusion Research (2010)
- [2.8] プラズマ基礎工学 増補版 堤井信力
- [2.9] 境界領域プラズマ理工学の基礎 高村秀一
- [2.10] 栗原公紀 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 修士論文

第 3 章

- [3.1] 真空の物理と応用 富永五郎, 熊谷寛夫

謝辞

本研究を進めるに当たり、研究室の方々に多くのご指導や激励など恩恵を授かりました。ここで感謝の言葉を述べさせていただきます。

吉田善章教授から学ばせて頂いたことは、はかり知れません。中でも最も勉強させて頂いたことは、物事を考えるということ全般についてです。先生のご指導やご発言、行動などあらゆる面から学ばさせて頂きました。自らの人生を実りあるものにするために必要不可欠なものを頂きました。また、ご指導に関しましては出来の悪い私を長い目で見守ってくださりありがとうございます。本研究は、先生が暗闇にいる私の足元を照らして導いて頂けなければ、ここまでの成果を上げることはできませんでした。ありがとうございました。

古川勝准教授には、計算機の使い方や時には実験に関することまで、幅広く面倒を見て頂きました。研究室の飲み会などでやさしくアドバイスして頂いた際のお言葉忘れません。

森川先生には、一番時間を費やしてご指導頂きました。M1 当初は私の研究に対する姿勢などで、ご迷惑ばかりかけていました。私が実験でうまくいかないとき、森川先生に手伝って頂くと、まるで魔法をかけたようにうまくいくことが何度もありました。プロの仕事を教えて頂き、凄みを感じることもばかりでした。研究に限らず、雑談でも私を気遣って頂き、森川先生のおかげでモチベーションを保ち研究出来ました。

齋藤先生には実験をする姿勢や技術などプロの実験屋の姿を見させてもらいました。私が基本的なことについて質問しにいくと忙しいのにもかかわらず、親身になってご指導して頂きました。また、時には冗談を言って私の気持ちを楽にして頂きました。

北山さんには、お食事や物品購入などでお世話になりました。私のルーズさで提出書類などが遅れてもやさしく接してくださりました。また研究室の飲み会などではメンバー全員が和やかになるお話しありがとうございます。

矢野さんについては、M1 の初期に工作の仕方など教えて頂きました。イオン加熱やこの先の業績をあげることを期待しています。

河井さんの規則正しい生活習慣や、研究に対する姿勢、勉強させて頂きました。

播磨さんには M1 当初、核融合プログラムの件でお世話になりました。素晴らしい業績を上げることが祈っております。

川面さんには、最後の最後本当に助けられました。また日々の生活を観察していても、研究に対する姿勢、勉強になりました。また、飲み会などでも研究の際と違う一面をうかがえて、人間的に魅力のある先輩でした。

金子さんはいつも深夜まで残り勉強しておられました。早くテーマが決まることを祈っております。

江本君の物事に対する探求心やその姿勢、非常に勉強になりました。気晴らしのスポーツや飲み会などを企画して頂き楽しく過ごさせて頂きました。実りある博士課程を送ることを祈っております。

杉浦君とはよくくだらない話ばかりを重ねていました。修論前に実験があり疲れている私にかけてくださった言葉など話していて楽になりました。

フォーゲル君は私のわかりにくい英語が聞き取りにくかったと思います。しかし、こちらは大変勉強になりました。

三上君、飯塚君には先輩として何一つためになることは出来ませんでした。申し訳ありません。これからの二人の研究の進展、期待しております。

最後となりましたが、今までの人生で一番色濃くこの二年間を過ごせたのは、皆さまのおかげです。本当にありがとうございました。これからの皆さまのご活躍、ご成功を祈っております。

小林真也

学会発表

1. プラズマ・核融合学会 第 27 回年会 口頭発表

「プラズマ境界部におけるイオン温度計測のためのサーマルプローブの開発」

小林真也, 吉田善章, 森川惇二, 齋藤晴彦, 矢野善久, 河井洋輔, 三上季範, 酒井貴雅

2. 日本物理学会 2011 年春季大会 口頭発表 (予定)

「サーマルプローブを用いた磁気圏型プラズマ(RT-1)境界部におけるイオン温度の計測」

小林真也, 吉田善章, 森川惇二, 齋藤晴彦, 矢野善久, 河井洋輔, 三上季範