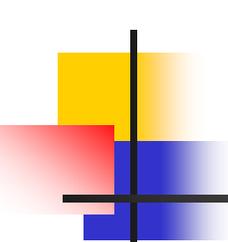


サーマルプローブ法による境界層プラズマ の熱流・イオン温度計測法の開発

栗原 公紀, 四竈 泰一¹⁾, 門 信一郎²⁾, 松浦 寛人³⁾, 田中 知¹⁾
(東京大学システム創成学科, ¹⁾東京大学大学院システム量子工学専攻,
²⁾東京大学高温プラズマ研究センター, ³⁾大阪府立大学機械工学分野)

第9回若手科学者によるプラズマ研究会 2006年3月16日於原研那珂



発表内容

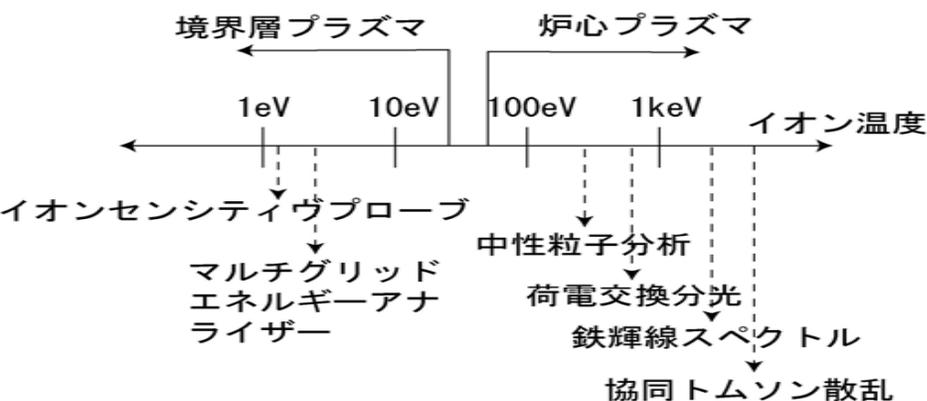
キーワード

1. 背景 境界層プラズマ、イオン温度計測法
2. 研究目的 サーマルプローブ法
3. 原理 伝熱現象、イオンの熱流
4. 実験装置 MAP-II、サーマルプローブ
5. 実験結果と考察 熱流計測の結果、中性粒子衝突
6. 総括

背景-イオン温度計測法-

境界層プラズマの流れを特徴付けるパラメーターの一つであるマッハ数や、ダイバータ板へのプラズマの熱流束の評価には、イオン温度が必要となる。

⇒境界層プラズマでのイオン温度測定的重要性



境界層プラズマでのイオン温度計測法の特徴 イオンセンシティブプローブ (ISP)

- 強磁場下で計測されつつある。
- 弱磁場下では計測が難しい。

マルチグリッドエネルギーアナライザー (MGA)

- 強磁場下、高温プラズマでは計測が難しい。

炉心プラズマではイオン温度を計測する手段は確立されている(主に荷電交換分光)が、境界層プラズマ(ダイバータプラズマなど)では確立された計測法はない。

また、ダイバータ板では炉心からもれてきた高温プラズマの炉壁への熱負荷を低減することが目的である。

⇒ダイバータ板での熱流計測 (現在確立された計測法がない)

⇒プラズマからの熱流に対するダイバータ板のエネルギー反射率の測定が必要である。

目的-サーマルプローブ計測法の特徴-

サーマルプローブ計測法は2002年頃にStamate(名大)により提案。
現在グロー放電の計測に使用されている。

⇒ダイバータプラズマ計測への応用

サーマルプローブ計測法の特徴

- イオン温度測定 of 原理・測定方法が容易である。
- プラズマの熱流・プローブにおける熱流の反射率からイオン温度を導出するため、熱流・反射率の同時計測・局所計測が可能。

ダイバータ領域におけるプラズマ計測のニーズに合致した計測法である

そこで本研究では次の三点を目的とした。

1. 伝熱モデルを元にサーマルプローブを設計
(共同研究者:松浦寛人助手(阪大)との共同作業)
2. サーマルプローブ法の原理検証。
3. ダイバータプラズマでのサーマルプローブ計測の校正実験
及び考察。

原理-プローブ中の伝熱現象-

温度が一番高いプラズマ照射面において

1)熱伝導

$$Q_C = -S \kappa \frac{dT}{dx} \Big|_{x=\text{照射面}}$$

熱伝導率

2)熱放射

$$Q_R = S \sigma (\epsilon_R T_p^4 - \alpha_R T_n^4)$$

放射率 吸収率
プローブ温度 中性ガス温度

3)Knudsen Effect

$$Q_K = Sp \frac{1}{4} \frac{\gamma+1}{4(\gamma-1)} \sqrt{\frac{8kT_n}{\pi m_i}} \alpha_K \left(\frac{T_p}{T_n} - 1 \right)$$

熱適応係数

4)ジュール加熱

$$Q_j = \rho \frac{L}{S} I_p^2$$

プローブ電流

プローブ内では、熱伝導が支配的である

2)Radiation

3)Knudsen Effect

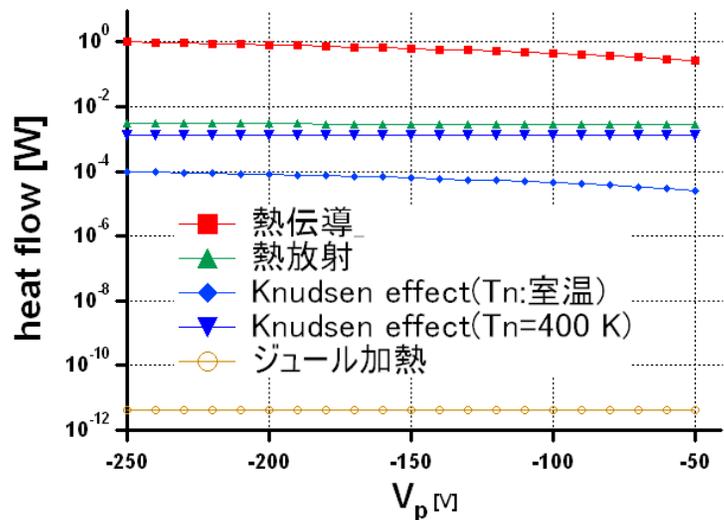
1)Conduction

4)Joule Heating

Water Cooling

Thermal probe

x

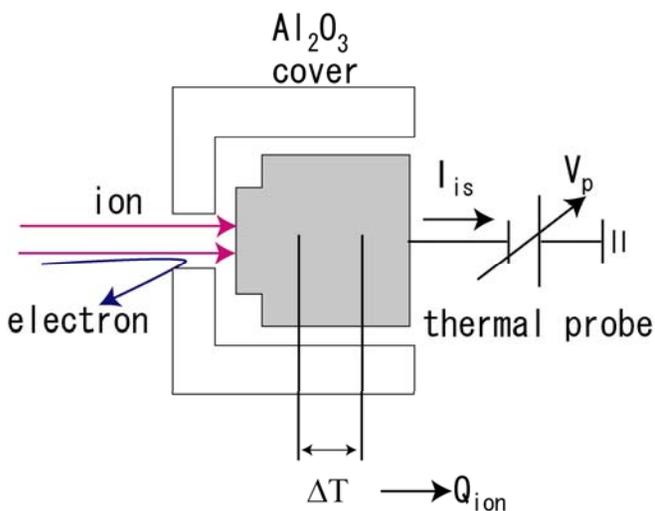
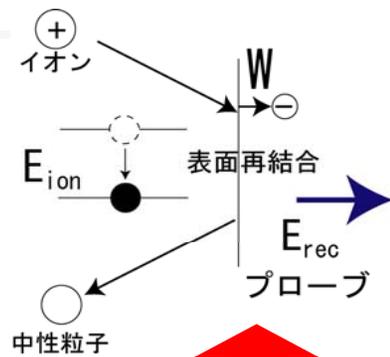


原理-イオンの熱流-

イオンの熱流 Q_{ion} は次の式で与えられる。

$$-K \frac{\Delta T_p}{\Delta x} S = Q_{ion} = \frac{I_{is}}{e} \times \left[\underbrace{e(V_s - V_p)}_{\text{イオンフラックス}} + \underbrace{2kT_i}_{\text{プローブまでの加速によるエネルギー}} \right] (1 - R_F) + \underbrace{eE_{rec}}_{\text{再結合によるエネルギー}}$$

温度勾配 $\Delta T_p / \Delta x$ (青)
 熱流 Q_{ion} (緑)
 イオン飽和電流 I_{is} (青)
 プローブ電圧 V_p (赤)
 イオン温度 T_i (青)
 エネルギー反射率 R_F (緑)
 再結合エネルギー E_{rec} (赤)



設定変数(赤): プローブ電圧

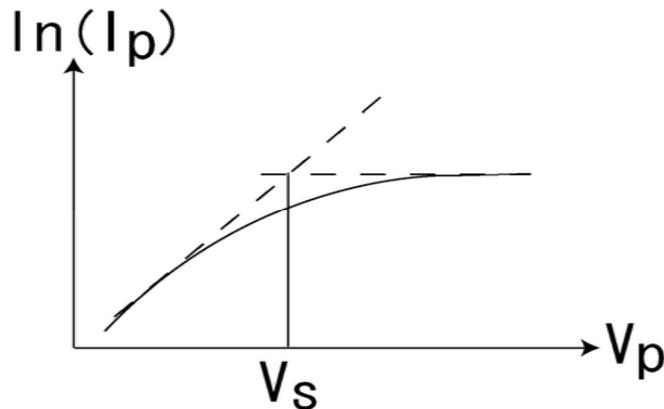
計測値(青): イオン飽和電流、温度勾配

目的値(緑): 熱流、イオン温度、エネルギー反射率

どのようにしてイオン温度、エネルギー反射率(空間電位)を求める？

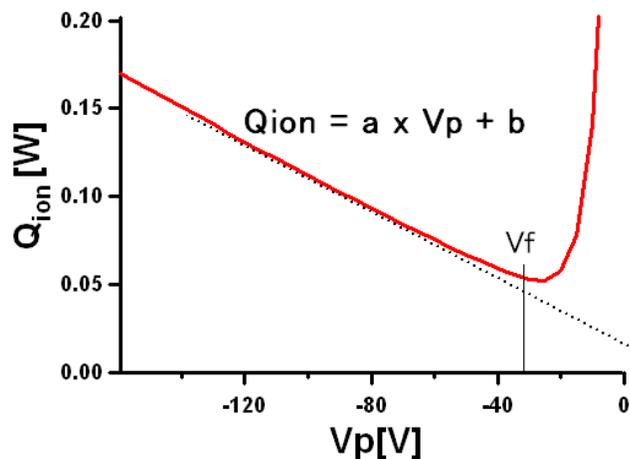
原理-熱流のつりあいとイオン温度導出-

計測された電流値の対数値を縦軸、プローブ電圧を横軸にとったグラフから



空間電位 V_s は電子反発領域の接線と電子飽和領域の接線との交点のバイアスから求まる。

計測された熱流を縦軸、プローブ電圧を横軸にとったグラフを直線近似して

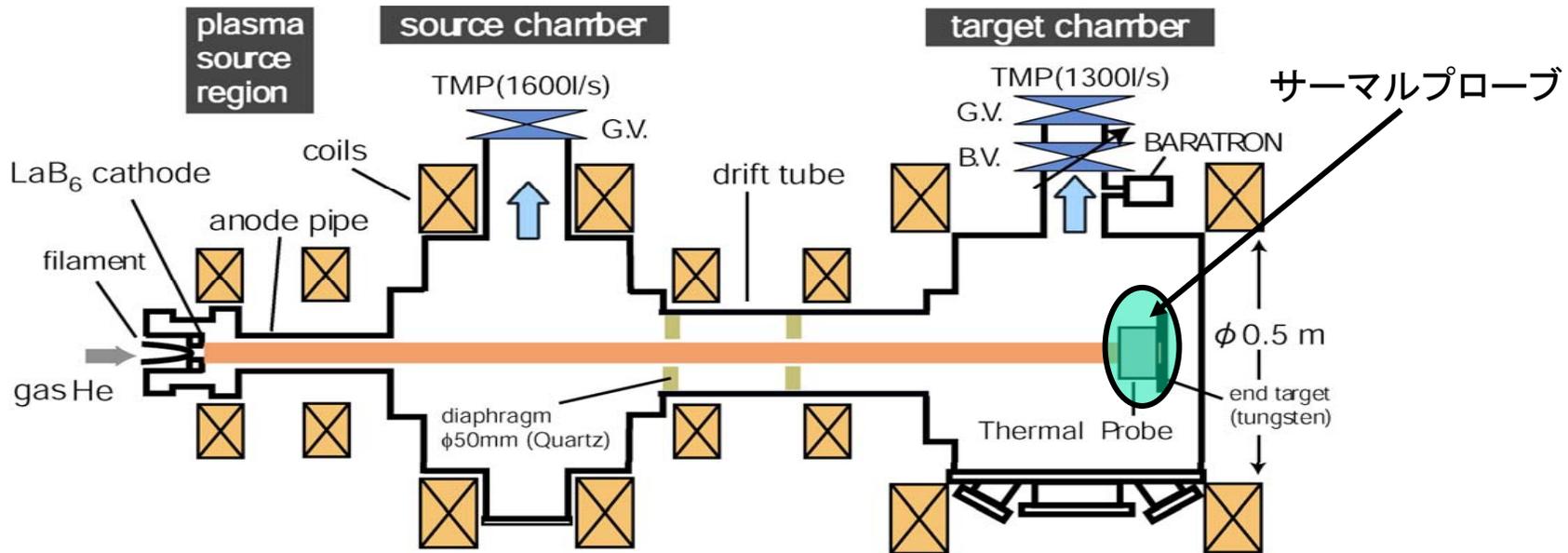


得られた傾き a と切片 b からエネルギー反射率とイオン温度が導出でき

$$a = \frac{I_{is}}{e} (1 - R_E)$$

$$b = \frac{I_{is}}{e} \left\{ eV_s + 2kT_i + e(E_{ion} - W) \right\} (1 - R_E)$$

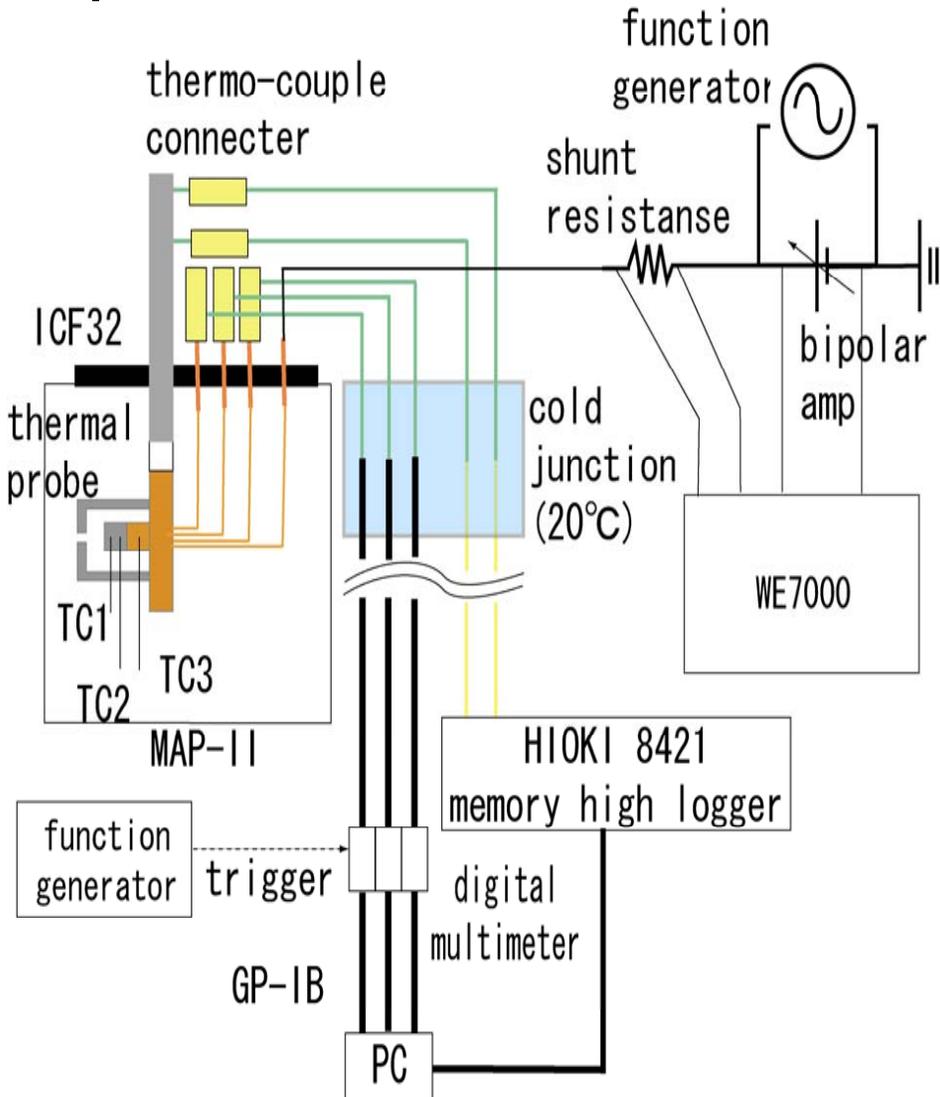
実験装置-直線型ダイバータ模擬装置MAP-II-



本研究は直線型ダイバータ模擬装置MAP(Material And Plasma)-IIの直流アーク放電プラズマにおいて実験を行った。イオン温度は分光の測定結果では0.5~0.8eVである。この程度のイオン温度は低すぎるため実際の測定は難しいが、本計測法の原理検証を行う。

Heプラズマにおいて
放電電圧: -70V程度
放電電流: 30A程度
磁場強度: 0.02T程度
中性粒子圧力: 1~20 mTorr
電子温度: 1~20 eV
電子密度: $1 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

実験装置-サーマルプローブ-



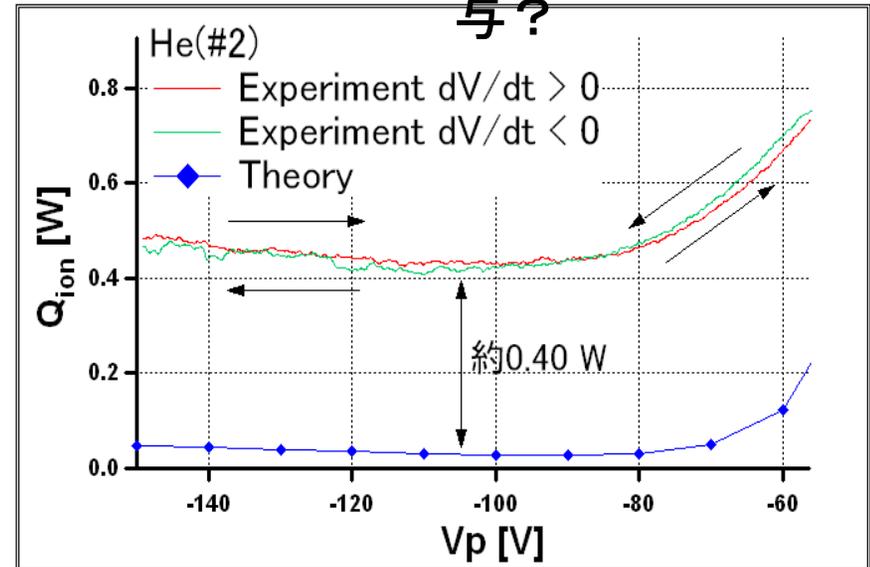
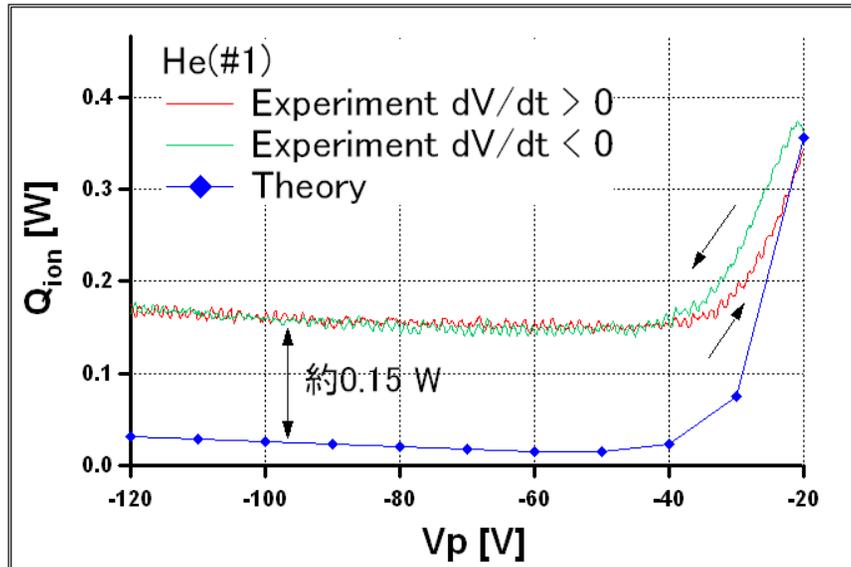
- 熱電対が3個(プラズマ側からTC1,TC2、TC3)装着されていることで、プローブ中の温度勾配が計測できる。また、冷却水の温度も別回路にて計測している。
- 熱起電力は熱電対の両端の温度によって決まるため、片端をサーマルプローブに設置し、片端を20°C設定の恒温槽によって温度固定している。
- 温度計測と同時に電流計測もできるため、電流電圧特性が得られる。

実験結果と考察-熱流-

2条件のヘリウム(He(#1)、He(#2))に対して実験を行った。理論値は電流電圧特性より得られたパラメータを用いて計算した。実験値(赤:緑)は理論値(青)よりも有意に大きい。よって、熱流に対してイオン以外の寄与があると考えられる。

	中性ガス圧力[mTorr]	浮遊電位-空間電位 [V]	電子温度[eV]	電子密度[m ⁻³]
He(#1)	<u>6.0</u>	-26	6.0	8.4x10 ¹⁶
He(#2)	<u>1.6</u>	<u>-40</u>	8.3	8.8x10 ¹⁶

高エネルギー電子の寄与?



考察-誤差を与える要因-

熱流の実験値と理論値との誤差(オフセット)を与える要因として以下が考えられる。

(1) プローブ全体への中性粒子衝突による寄与(Knudsen effect)

$$Q_K = \frac{1}{4} \frac{\gamma+1}{4(\gamma-1)} p S \sqrt{\frac{8kT_n}{\pi m_i}} \left(1 - \frac{T_p}{T_n}\right)$$

(2) アルミナカバーからの輻射伝熱による寄与

$$Q_R = S \sigma \left(\overbrace{T_c}^{\text{カバー温度}}{}^4 - T_p^4 \right)$$

(3) 熱伝導断面積の実効的低下

プローブ側面から熱流入がある場合熱伝導の実効面積が小さくなっている可能性がある。

このときにオフセットと等しい熱量を得られる次の値について評価した。

(1) 中性粒子の温度

(2) アルミナカバーの温度

(3) 実効断面積の元の断面積に対する割合

考察-評価の結果-

オフセットを与えるそれぞれの寄与に関する計算結果を表に示す。

	中性粒子温度[K]	アルミナカバー温度[°C]	実効断面積 / 断面積
He(#1)	<u>445</u>	99	17%
He(#2)	1060	184	11%

He(#1)の(1)はMAP-IIIにおける条件として起こりうる値でありガス圧力計測に矛盾しない結果となった。しかしながらHe(#2)との差については今のところ解明できていない。準安定原子による寄与等の可能性も検討している。

(2), (3)についての寄与の可能性は低いとの結論を得た。しかし、これらは実際の測定や厳密な計算から得られたわけではないため、更なる検討が必要である。

総括-まとめと今後の展望-

サーマルプローブによる熱流及びイオン温度測定に関する研究を行ったことで、次の2つの事柄が判明した。

1) 熱流の測定

計測された熱流がシース理論から予想されるイオンの熱流よりも有意に大きくなることがわかった。この原因として、**中性粒子の衝突が寄与している**可能性が高いことも確かめられた。

2) 新たな可能性

- 中性粒子ガスの寄与を見積もることができれば**イオン温度の計測**ができる。
- イオン温度が既知である場合において、**サーマルプローブ法による中性粒子ガス温度の測定**ができる。

今後の展望

- 熱流を決める素過程の解明、それを元にしたイオン温度の測定。
- 将来的に実際の核融合装置での計測