

内部導体装置Mini-RTの ECHプラズマ特性

東大新領域

谷塚英一

研究の背景

二流体緩和理論

Mahajan-Yoshida によって流れのあるプラズマの新しい緩和平衡状態が提唱された*

$$\vec{E} + \vec{V}_e \times \vec{B} + \frac{1}{en} \vec{\nabla} p_e = 0$$

$$\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_i = \frac{e}{M} (\vec{E} + \vec{V}_i \times \vec{B}) - \frac{1}{Mn} \vec{\nabla} p_i$$

規格化

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = (\vec{V} - \vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} + \vec{\nabla} (p_e - \phi)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\vec{V} + \vec{A}) = \vec{V} \times (\vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{V}) - \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 + p_i + \phi \right)$$

研究の背景

二流体緩和理論

緩和条件

$$\vec{V} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = a\vec{B}$$

$$\vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{V} = b\vec{V} \quad a, b \text{ は定数}$$

この平衡が成り立つとき

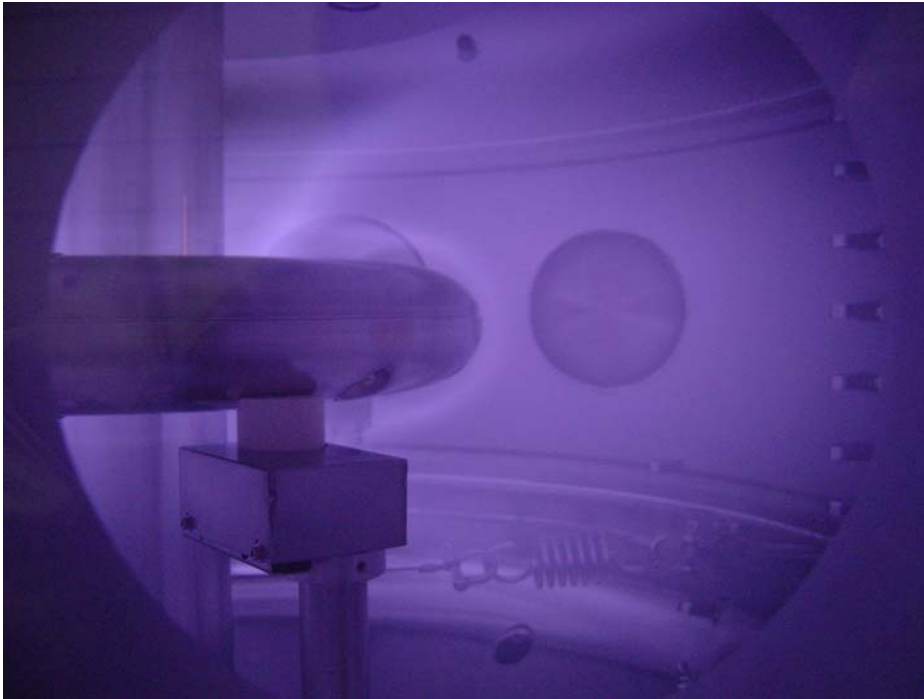
$$V^2 + \beta = \text{Const.}$$

という重要な結論に帰着する

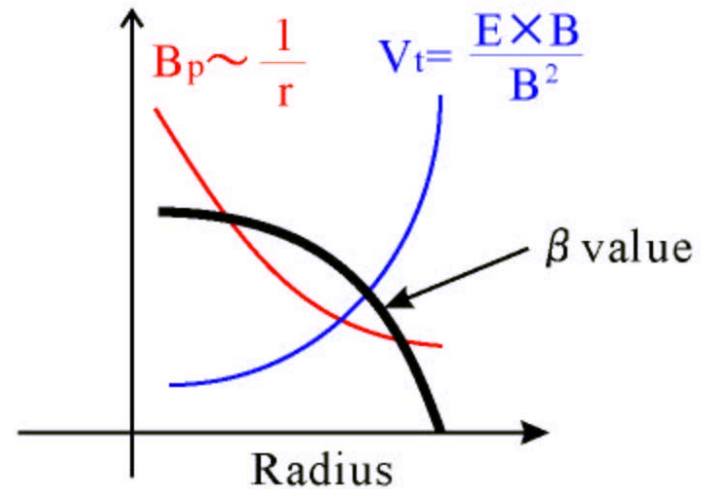
* S.M.Mahajan and Z.Yoshida, Phys. Rev. Lett, **81**, 4863 (1998)

研究の背景 II

内部導体装置による高ベータプラズマ閉じ込めのアイデア



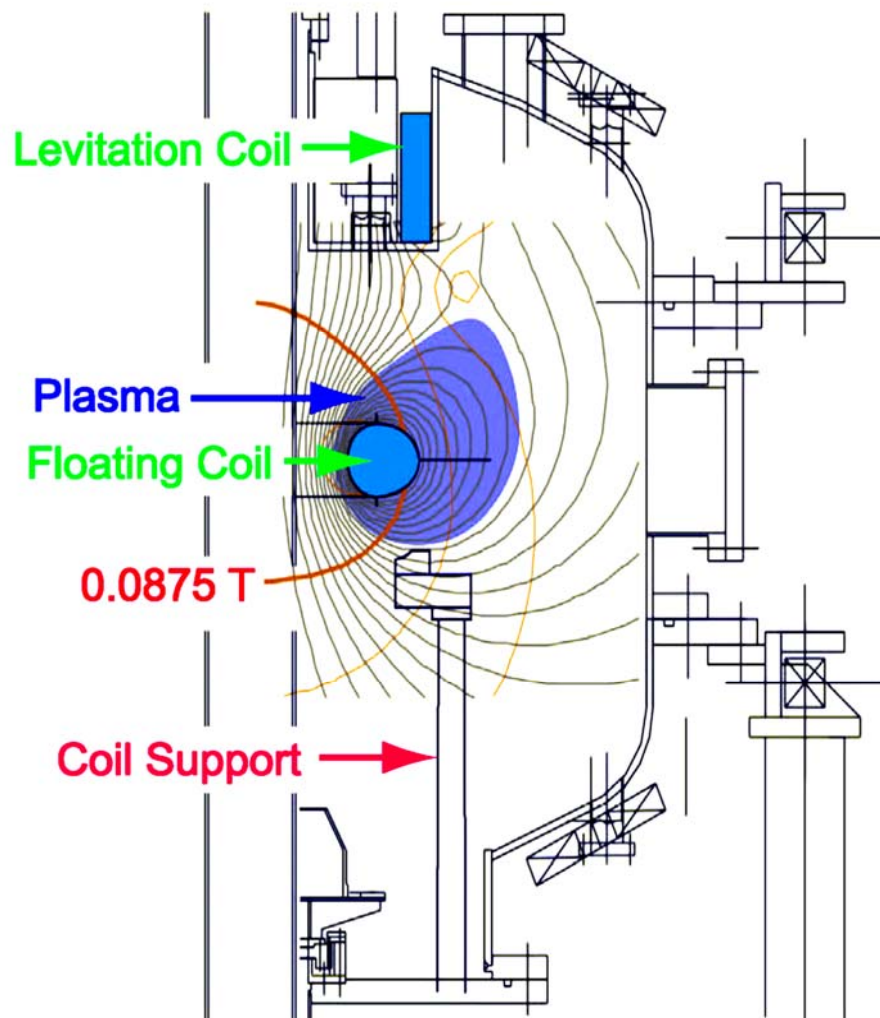
$$V^2 + \beta = \text{Const.}$$



プラズマの非中性化による径電場で $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフトによるトロイダル方向流れを生成

内部導体近傍で高ベータプラズマ閉じ込めの可能性

内部導体装置Mini-RT



真空容器内の超伝導コイルを磁気浮上させて実験を行う

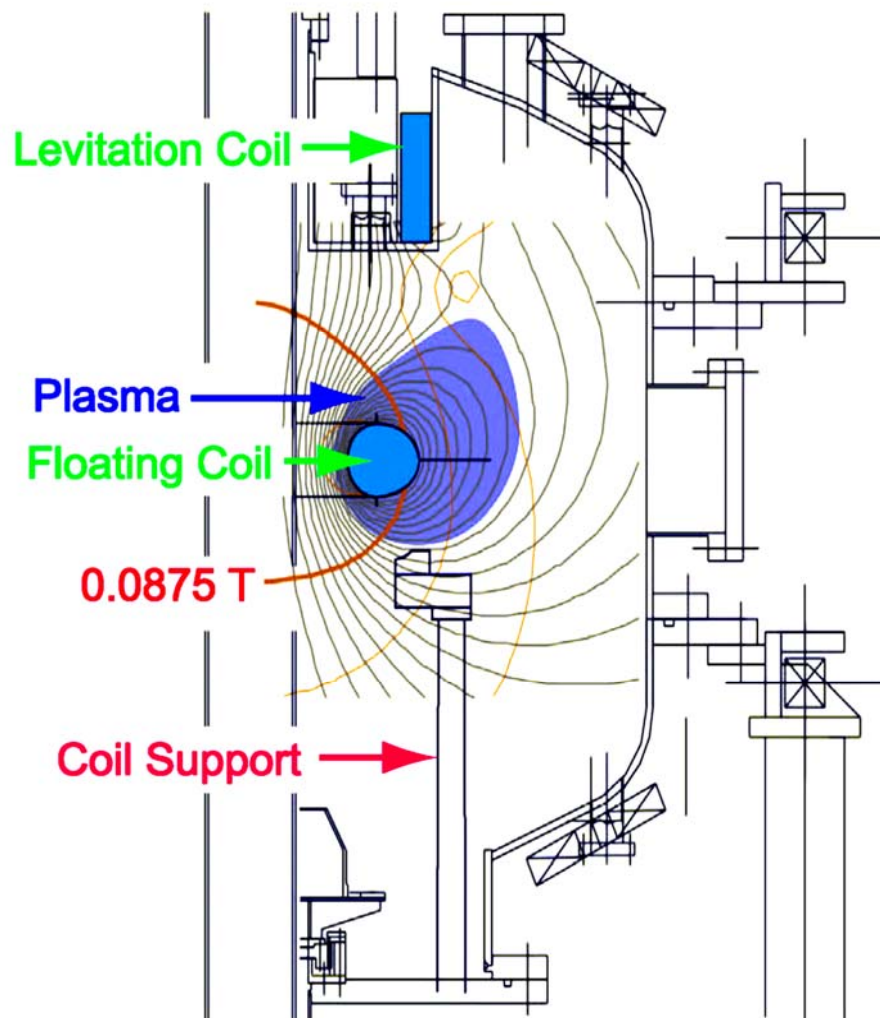
超伝導コイルはHeガスによって20Kまで冷却

永久電流スイッチ(PCS)を用いた直接通電法で励磁

浮上したコイルの位置はレーザー変位計によって測り, フィードバック制御

2.45GHzのECHでプラズマを生成

内部導体装置Mini-RT



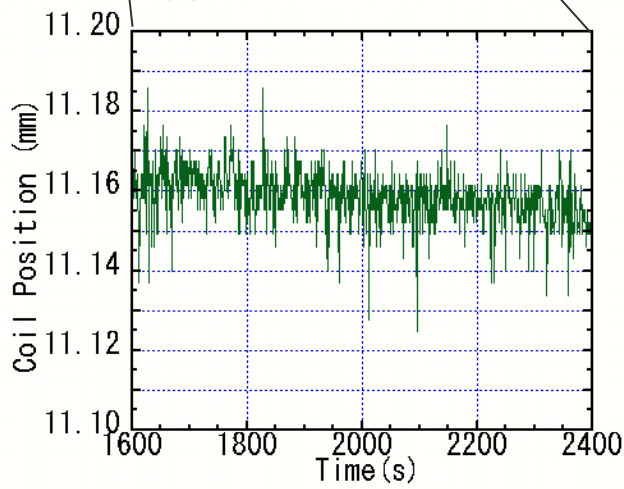
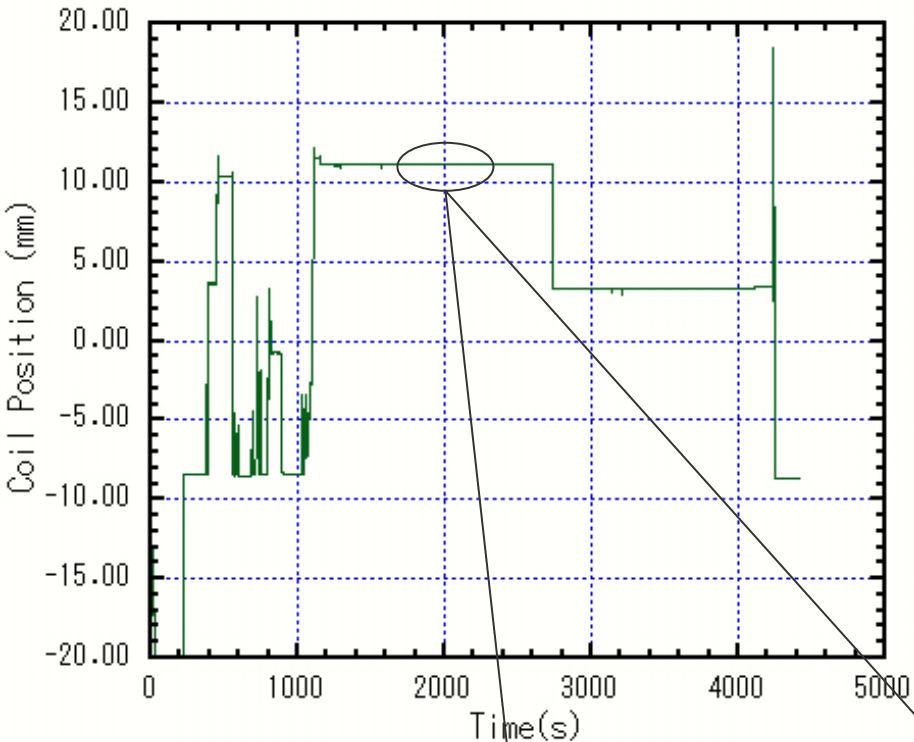
装置緒元

主半径	0.50 m
高さ	1.0 m
磁場強度	0.1 T
プラズマ生成	ECH 2.45GHz

超伝導コイル緒元

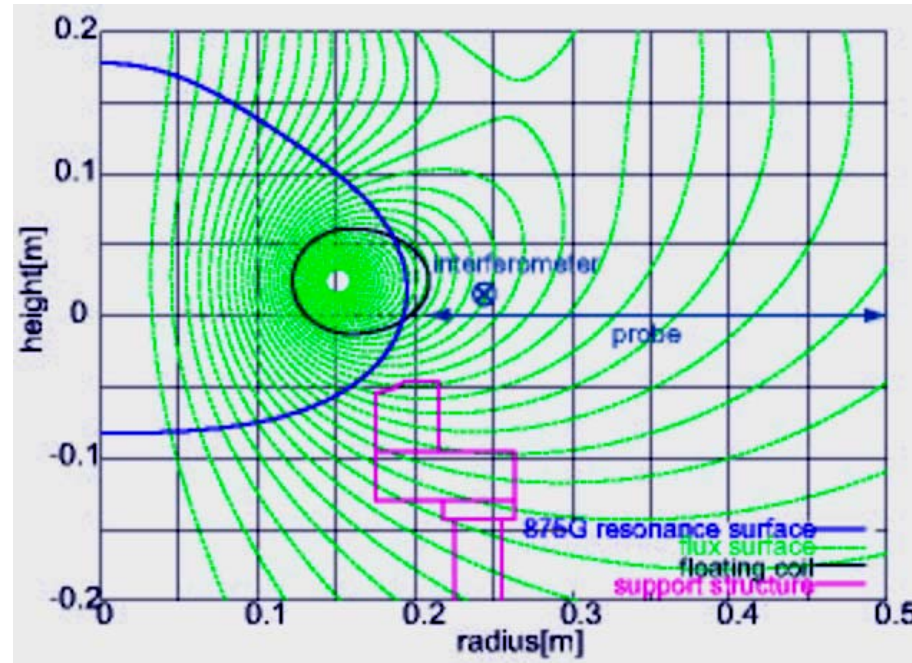
主半径	0.15 m
ターン数	428
線材	Bi-2223
定格電流	50kATurns

内部導体磁気浮上



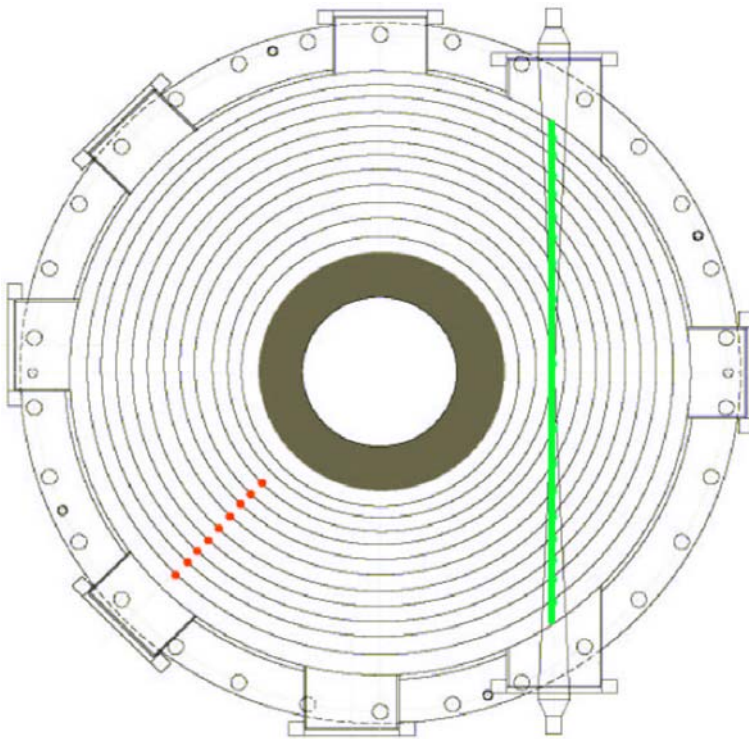
内部導体電流40kAturns、
引き上げコイル電流
15kAturnsでの浮上試験
浮上位置精度は**10 μ m**

ダブルプローブによる電子密度計測



1. マイクロ波干渉計によって測定した線平均電子密度との比較
2. コイル浮上状態での電子密度径方向分布の測定
3. 電子密度への支持脚の影響の測定

ダブルプローブと干渉計の測定値の比較

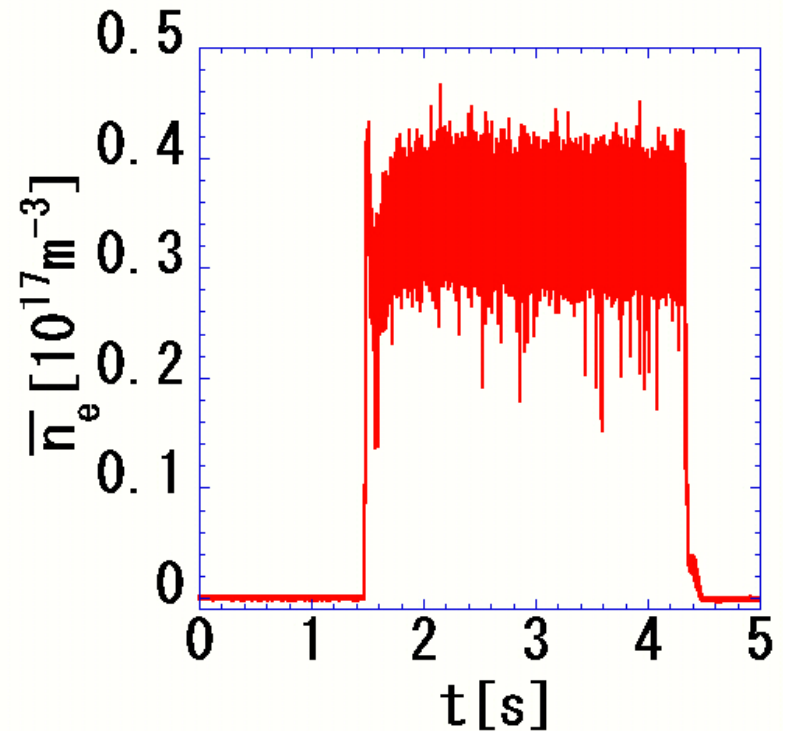
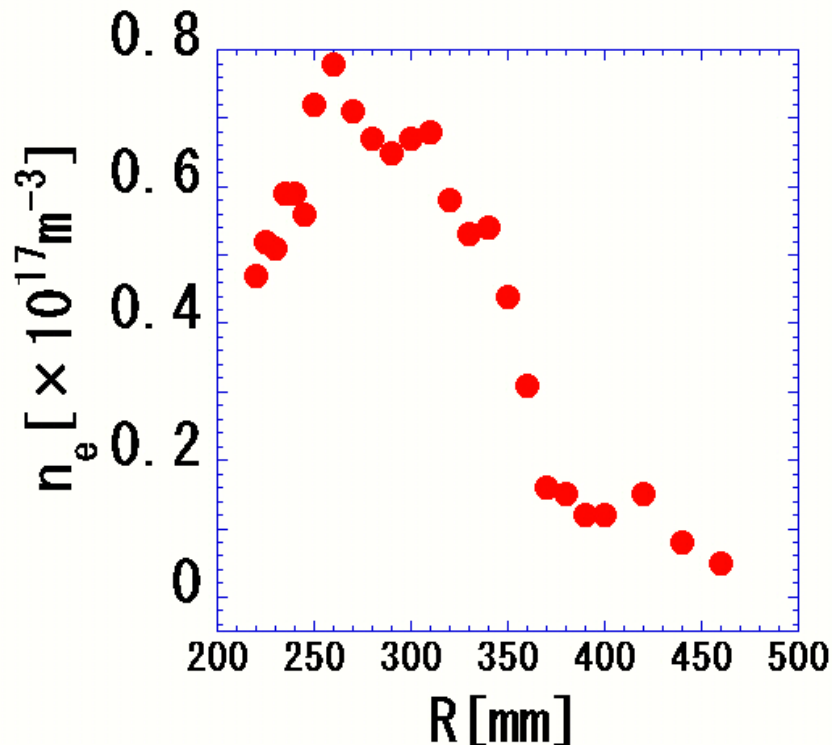


浮上コイル	支持
背景ガス圧	4.4×10^{-2} Pa
コイル電流	23 kATurns
ECH入射パワー	1.8 kW

仮定：磁気面上で電子密度と電子温度は一定

ダブルプローブで測定された電子密度を線積分してマイクロ波干渉計の測定値と比較した

ダブルプローブと干渉計の測定値の比較



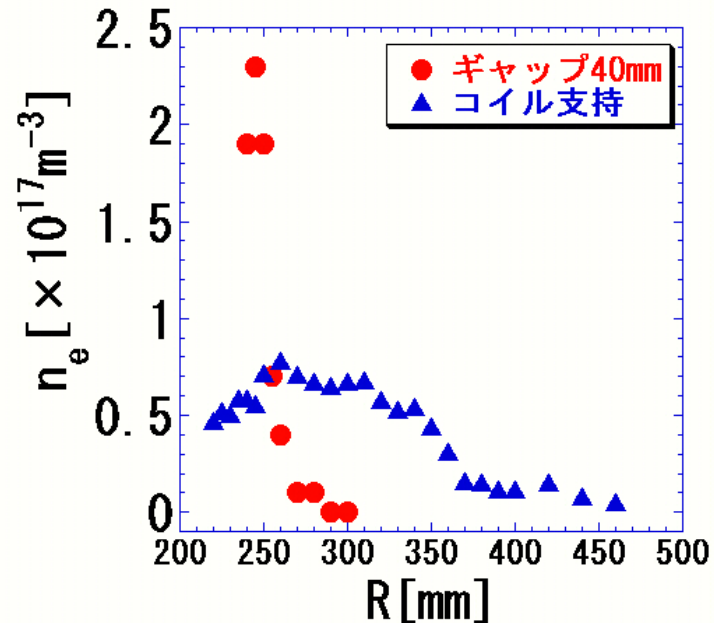
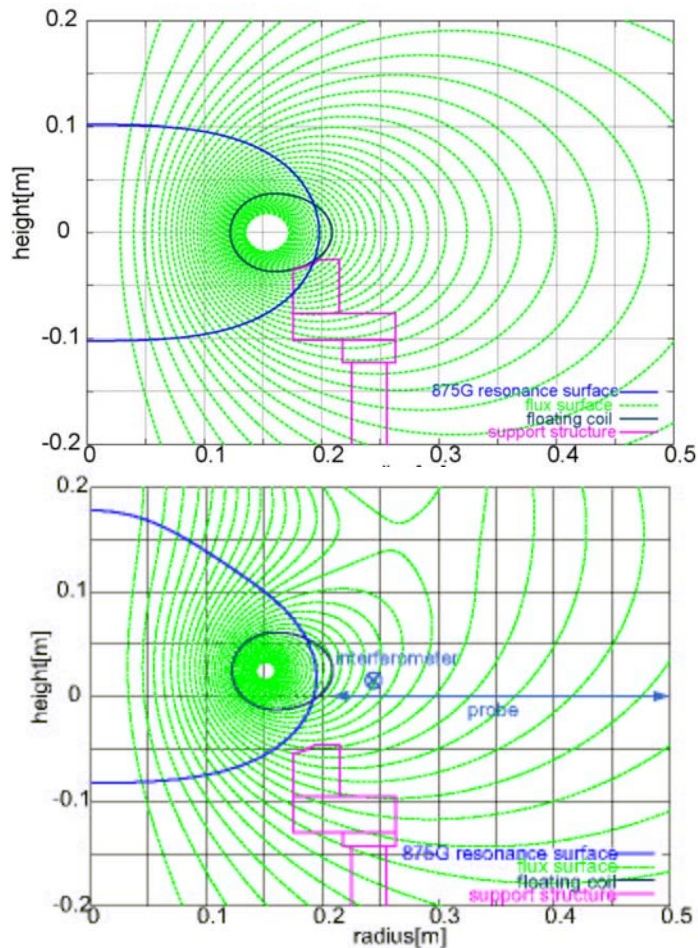
ダブルプローブによる電子密度測定結果

両者の結果はよく一致している

ダブルプローブは十分な測定制度を持つと判断する

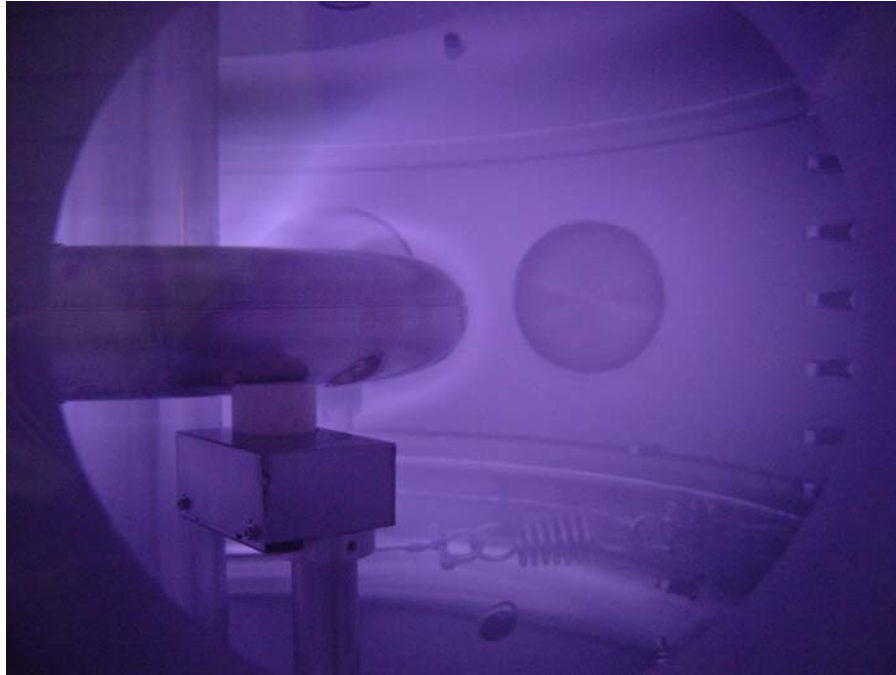
ダブルプローブによるコイル浮上状態での 電子密度径方向分布測定

コイル支持状態と浮上状態の比較

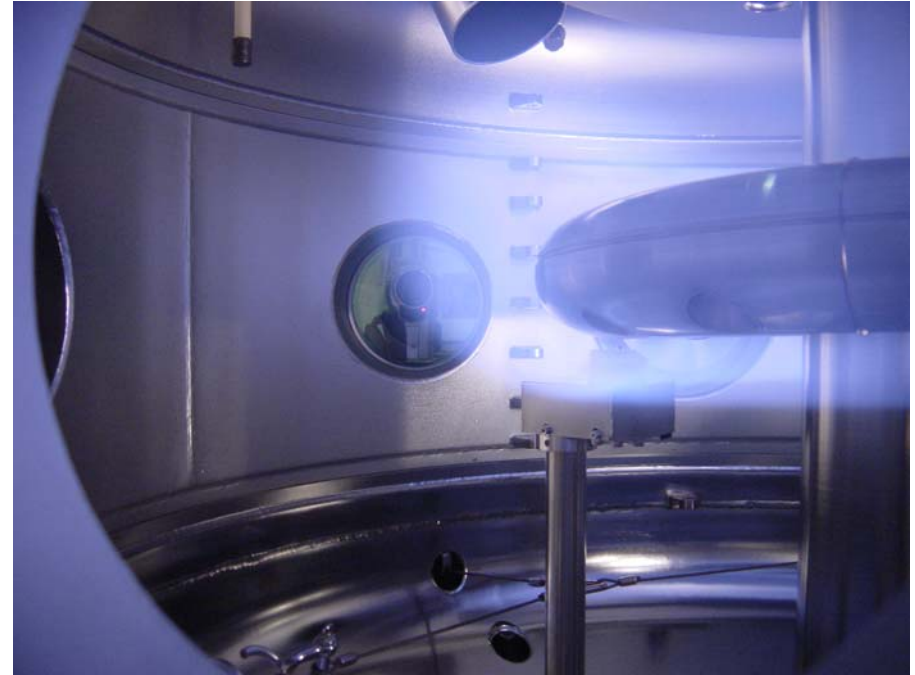


コイル浮上時はセパトリックス付
近で電子密度がほぼ0まで下がる

コイル支持状態と浮上状態の違い



支持状態

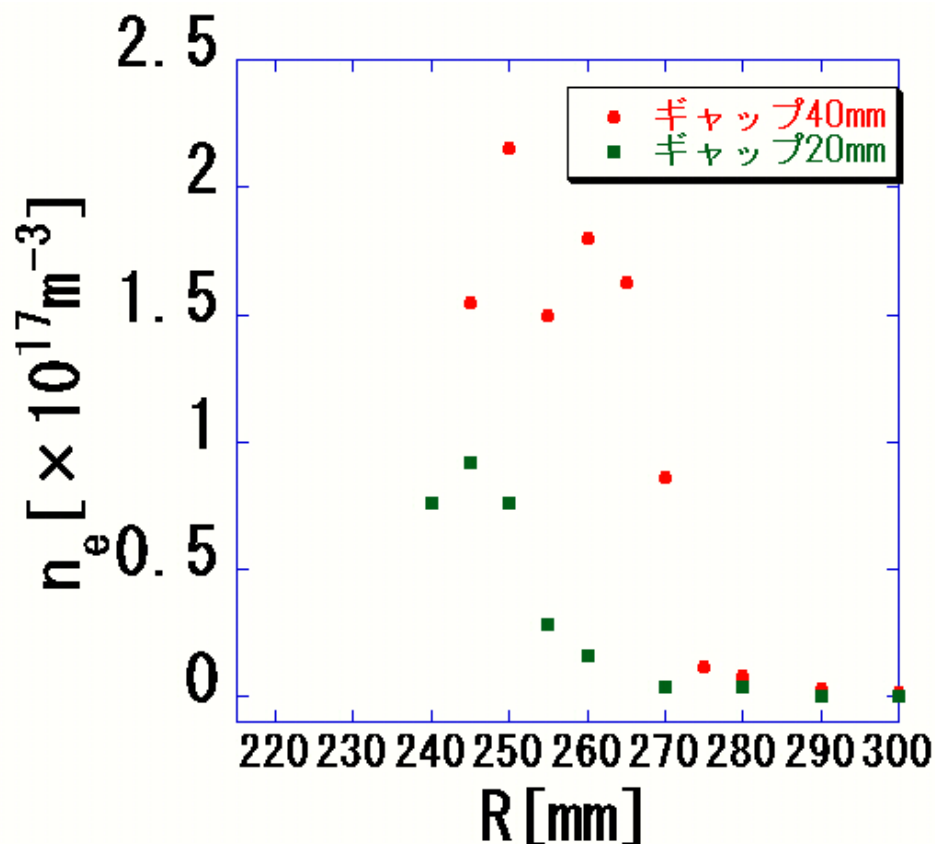


浮上状態

セパトリックスによってプラズマの存在する領域が限定されていることが視覚的に分かる

ダブルプローブによるコイル浮上状態での 電子密度径方向分布測定

浮上距離の違いによる径方向分布の違い

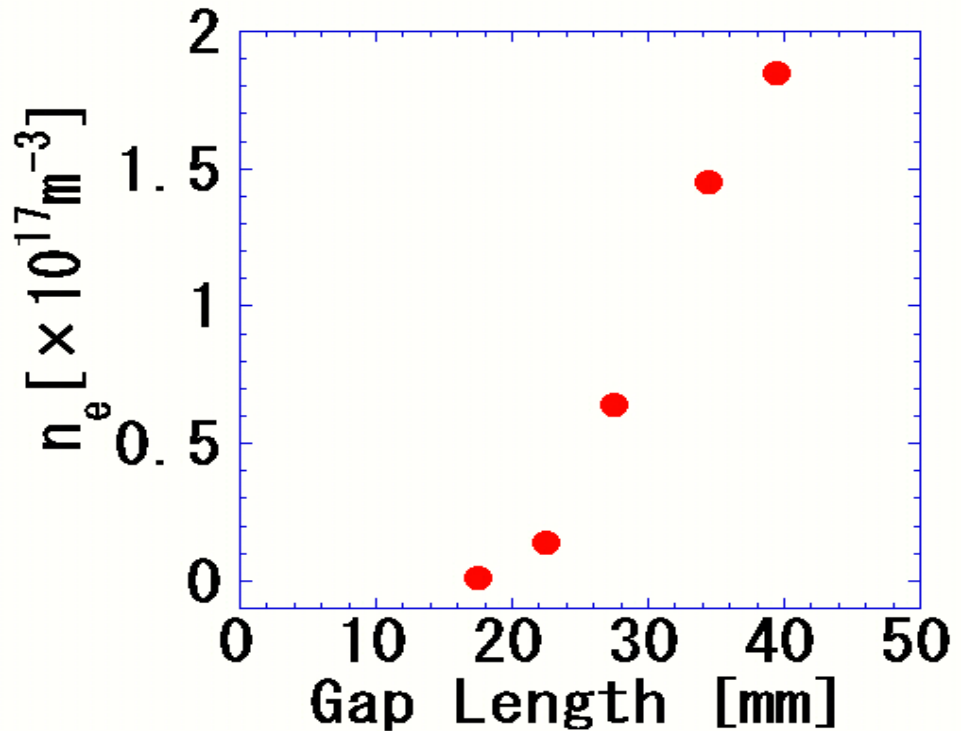


R=280mm 付近がセパトリックスにつながる磁気面で、外側にはプラズマが存在しない

40mm浮上時のほうが
20mm浮上時と比較して
高密度な領域が広い

浮上コイル支持脚の影響

プローブ位置	260 mm
背景ガス圧	3.4×10^{-3} Pa
コイル電流	33 kATurns
ECH入射パワー	2.4 kW



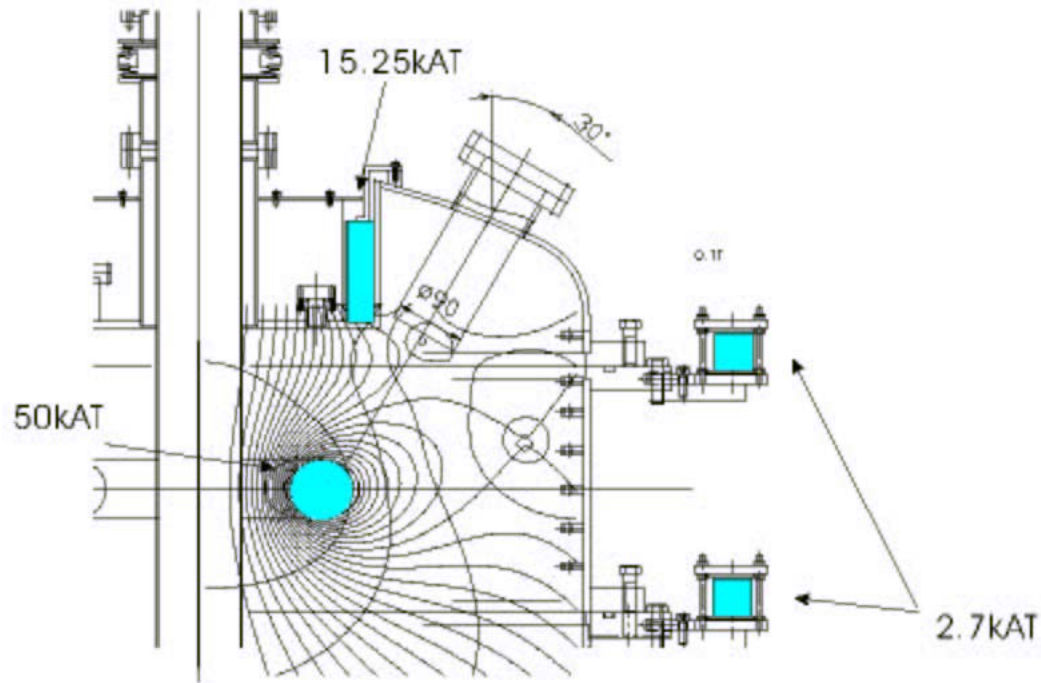
支持脚をセパトリックスよりも内側に挿入すると電子密度は急激に下がる. さらにギャップを15mm以下にするとプラズマが生成できなくなった

コイルを浮上させることによってプラズマの閉じ込めが改善されることが裏付けられた

今後の展望

磁気面形状

垂直磁場コイルを設置すればセパトリックスの位置をコイルから離すことができる

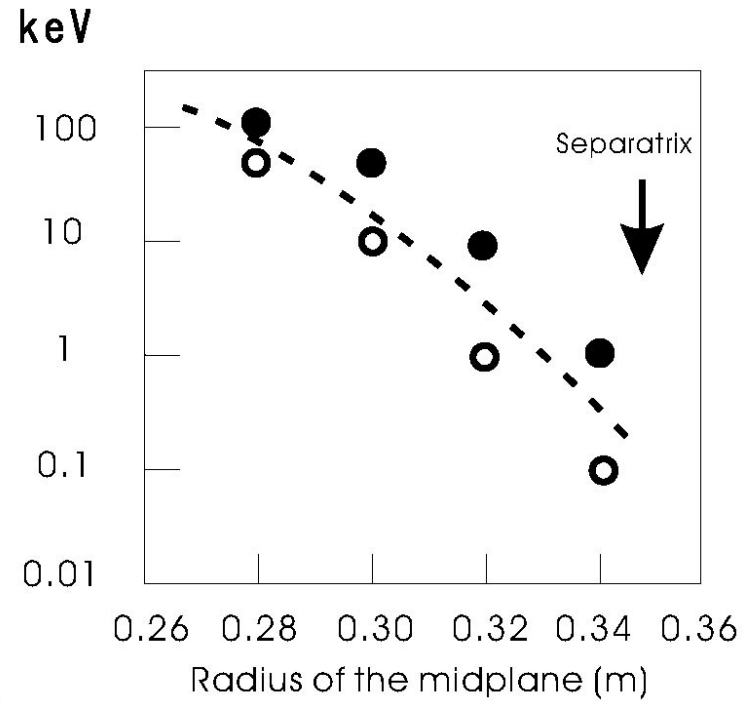
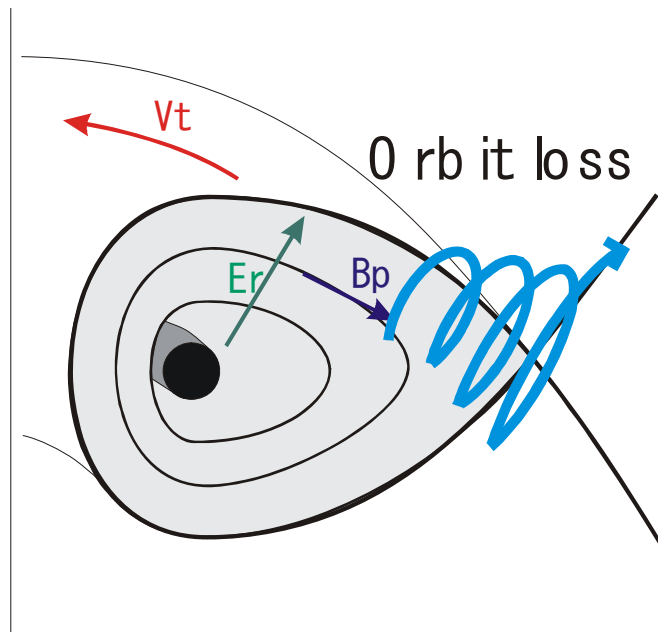


より広い範囲で高密度のプラズマ生成が可能

今後の展望

高速プラズマ流の駆動

Mini-RTでは流れ駆動のための非中性化をECRによる高エネルギー電子の軌道損失によって行うことを目指している



*D.Hori, 東京大学修士論文(2003)

今後の展望

ECRによる高エネルギー電子の生成には背景ガス圧を下げて完全電離し、中性粒子による損失を抑制することが重要

支持状態では 1.0×10^{-2} Pa

支持脚をセパトリックス磁気面から出したとき 1.5×10^{-3} Pa

以上の背景ガス圧でプラズマを生成することに成功

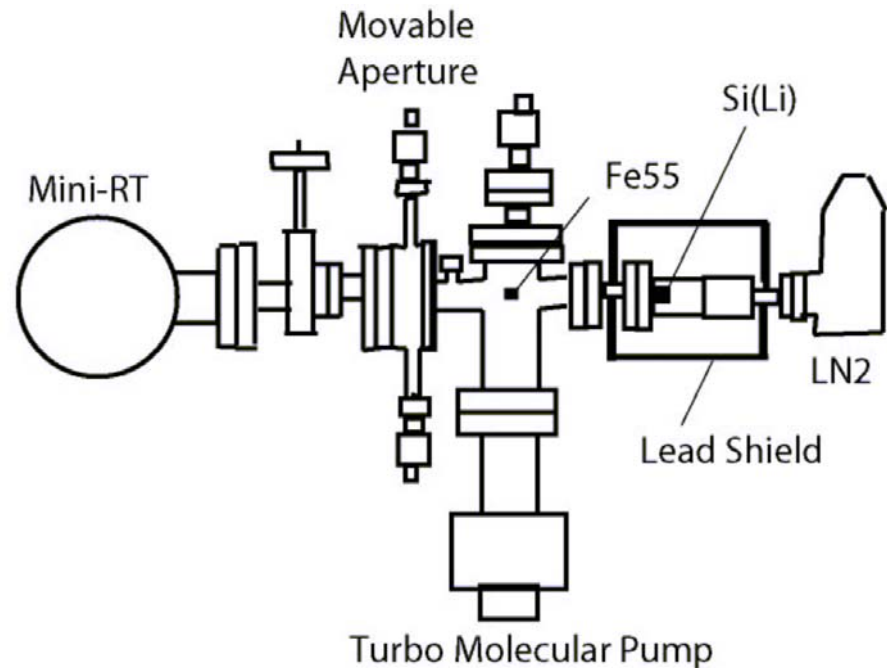
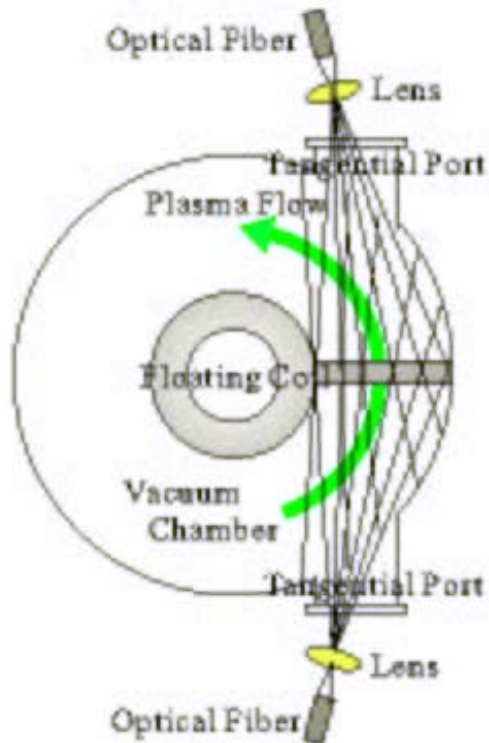
$1.0 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ の電子密度の水素プラズマでは 4.8×10^{-4} Paの背景ガス圧でプラズマを生成すれば完全電離

今後の展望

実験計画

コイル浮上状態で分光器によるプラズマ流, イオン温度等の計測

Si(Li)半導体検出器による軟X線パルス波高解析



結論

- 1 内部導体装置Mini-RTで超伝導コイルが浮上した状態の電子密度の径方向分布, 支持脚の影響を測定した
- 2 測定に用いたダブルプローブはコイル支持状態でマイクロ波干渉計によって測定された線平均電子密度と較正が取れている
- 3 コイル浮上状態ではセパトリックスよりもコイル側にプラズマが生成される
- 4 支持脚をセパトリックスよりもコイル側の磁気面に挿入すると電子密度は急激に下がる. 逆に言うと支持脚とコイル間のギャップを大きくすることによってプラズマの閉じ込めは改善される