



2002年3月4～6日 若手研究者によるプラズマ研究会



大型ヘリカル装置における 周辺・ダイバータプラズマ及び プラズマ・対向壁間相互作用研究

増崎 貴、LHD実験グループ(核融合研)

共同研究者諸氏(東大、長野高専、北大)



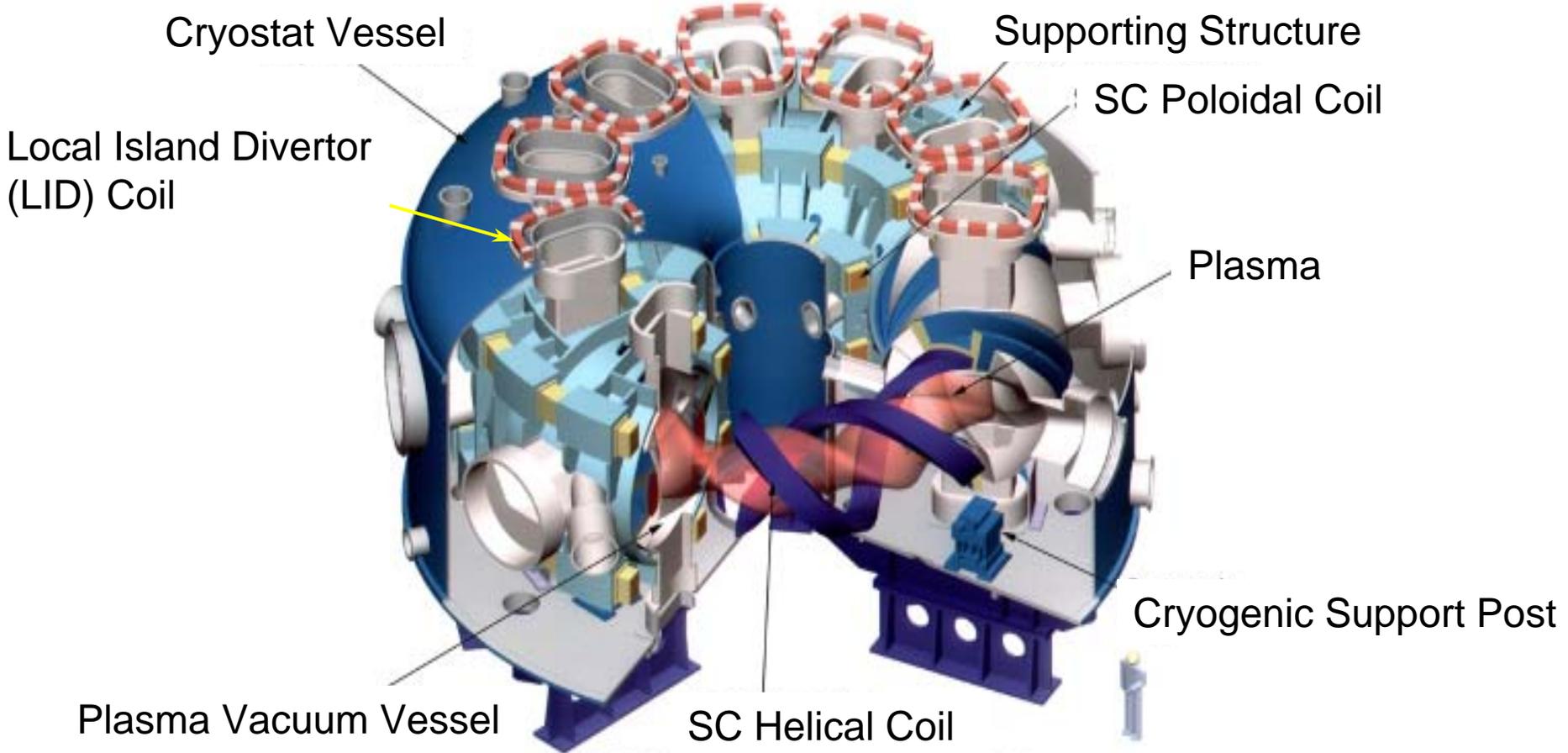
発表内容



1. はじめに ~ LHDの紹介を兼ねて ~
2. LHDにおける周辺及びダイバータプラズマ
3. LHDにおけるプラズマ・対向壁間相互作用



大型ヘリカル装置 (LHD)



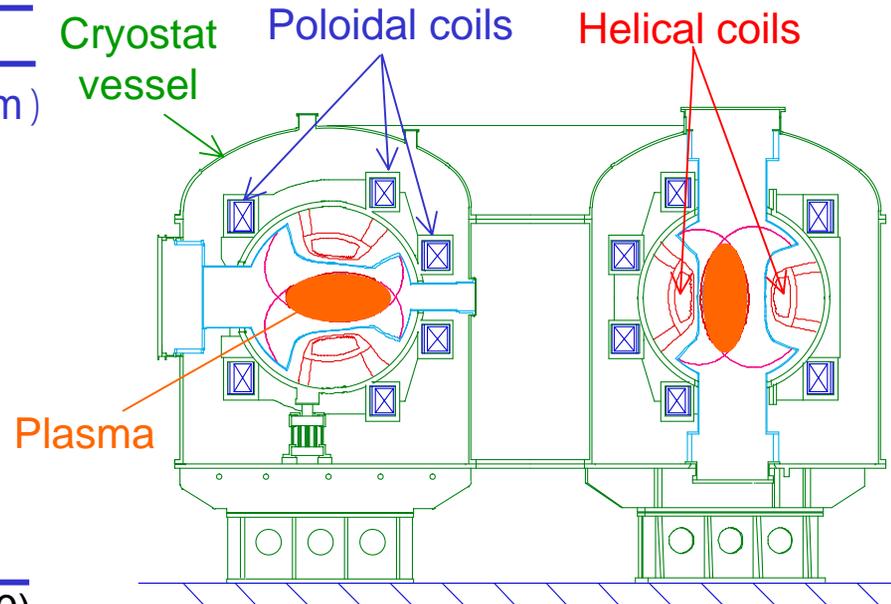


大型ヘリカル装置 (LHD)



Specifications of LHD (2001)

Plasma Major radius	3.5 – 4.0 m (mainly 3.6m)
Plasma Minor radius	~ 0.6 m (average)
Plasma Volume	~ 30 m ³
Coil minor radius	0.975 m
Magnetic field	~ 2.9 T (at R _{ax} =3.5m)
Heating power	
ECH	1.9 MW
N-NBI	9.0 MW
ICRF	2.4 MW



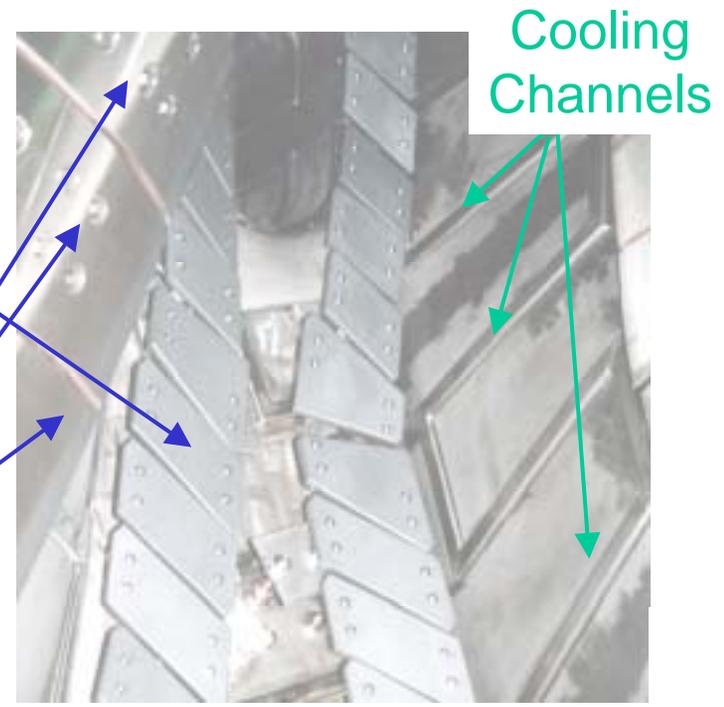
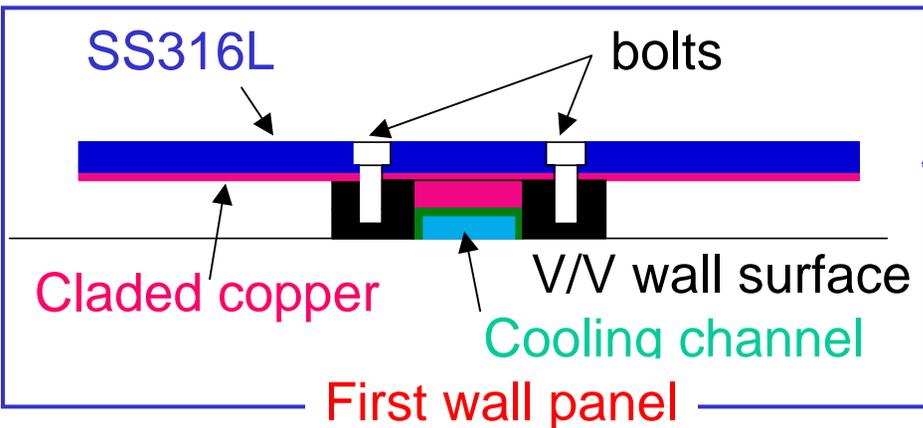
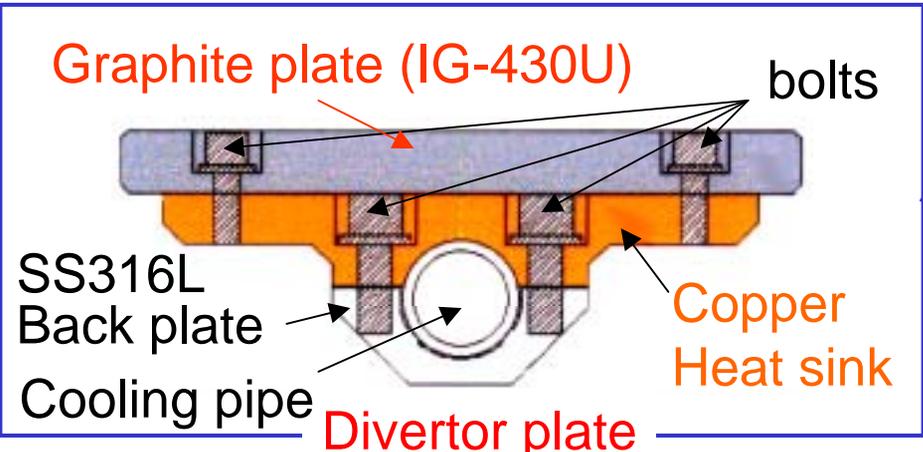
Achieved Plasma Parameters (2000)

	T_e	T_i	τ_E	P_{abs}	\bar{n}_e
High T_e	4.4 keV	2.7 keV	0.06 s	1.8 MW	$5.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
High T_i	3.3 keV	3.5 keV	0.09 s	3.9 MW	$1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
High τ_E	1.1 keV	-	0.3 s	2.0 MW	$6.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

$n\tau T$	$2.0 \times 10^{19} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sec}$
Maximum Stored Energy	1.03 MJ
Highest Beta	$\langle \beta \rangle \sim 3\% \text{ at } B_t = 0.5 \text{ T}$
Maximum Density	$1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

Designed for Steady State Operation

Actively cooled first wall panels and **divertor plates** were installed.



Torus inboard side of LHD
 Wall temperature is limited below 95C to avoid the heat invasion to SC coils.



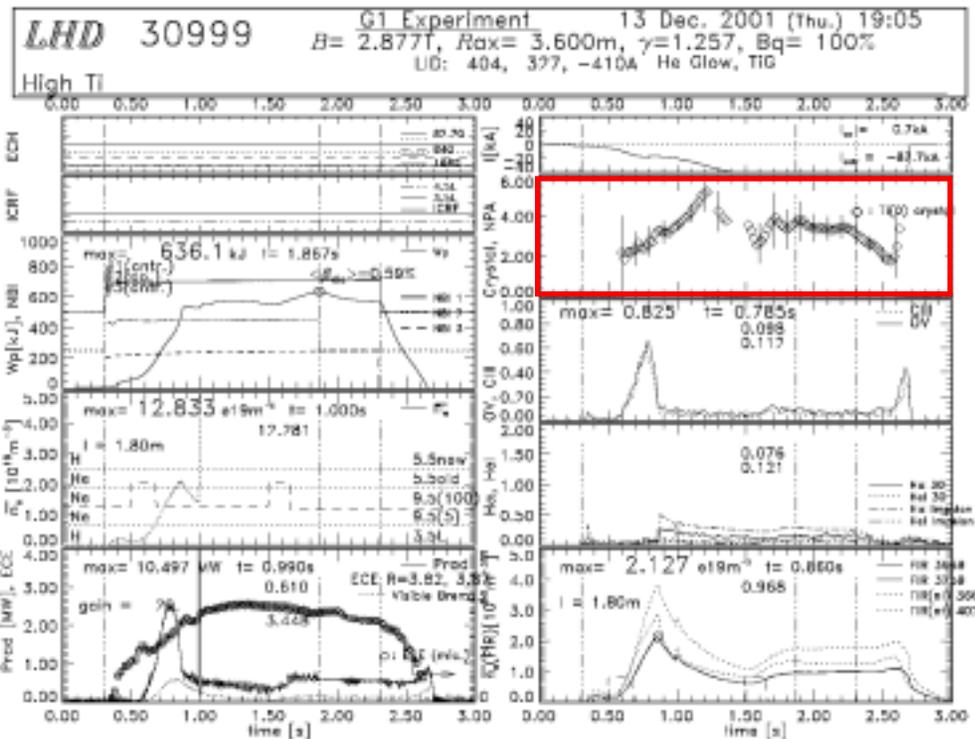
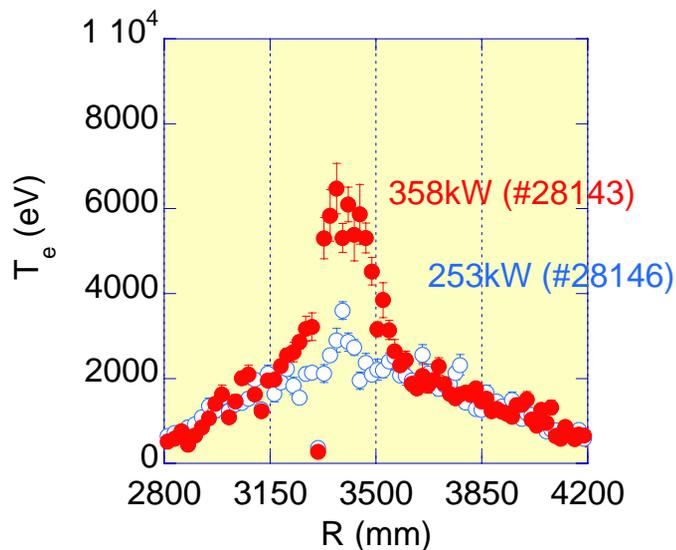
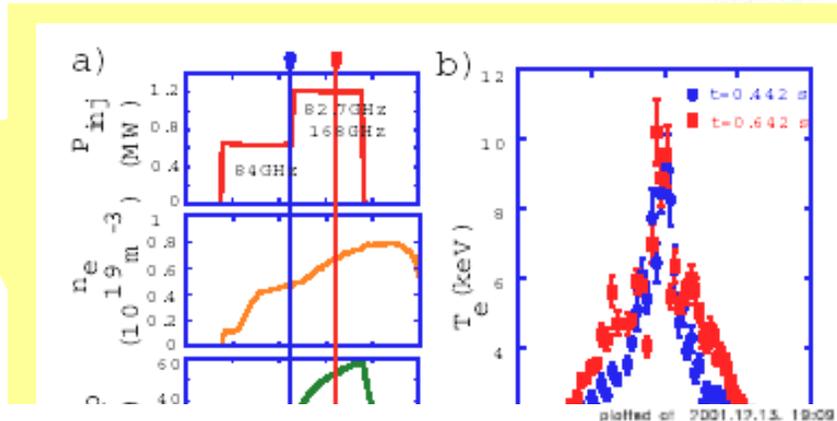
LHDにおける今年度実験の成果



1. 電子温度 10 keVの達成

2. イオン温度 5 keVの達成

3. 内部輸送障壁の形成？





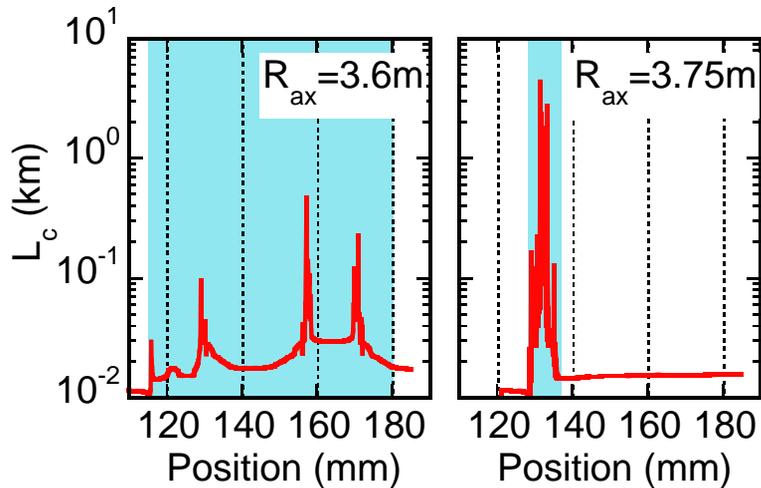
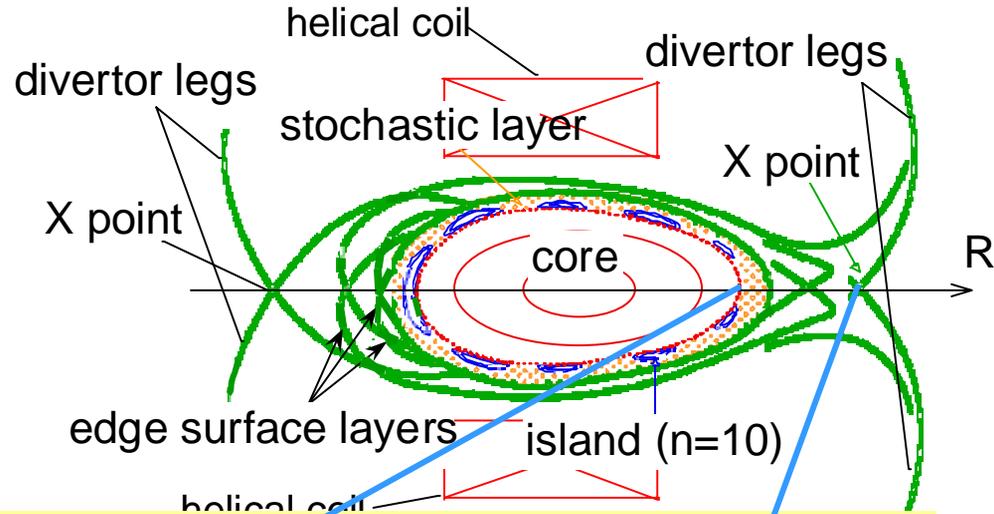
発表内容



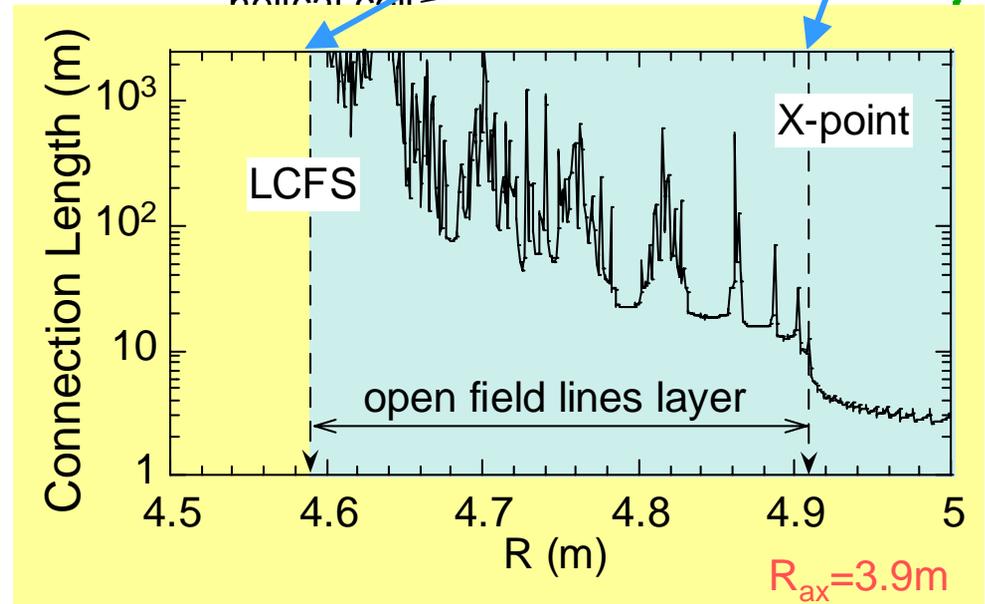
1. はじめに ~ LHDの紹介を兼ねて ~
2. 周辺及びダイバータプラズマ
 - ・ LHDの周辺磁場構造 ~ヘリカルダイバータ配位~
 - ・ヘリカルダイバータプラズマ特性
 - ・周辺プラズマ特性
3. プラズマ・対向壁間相互作用

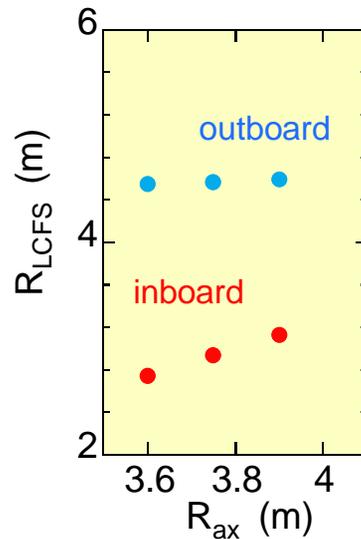
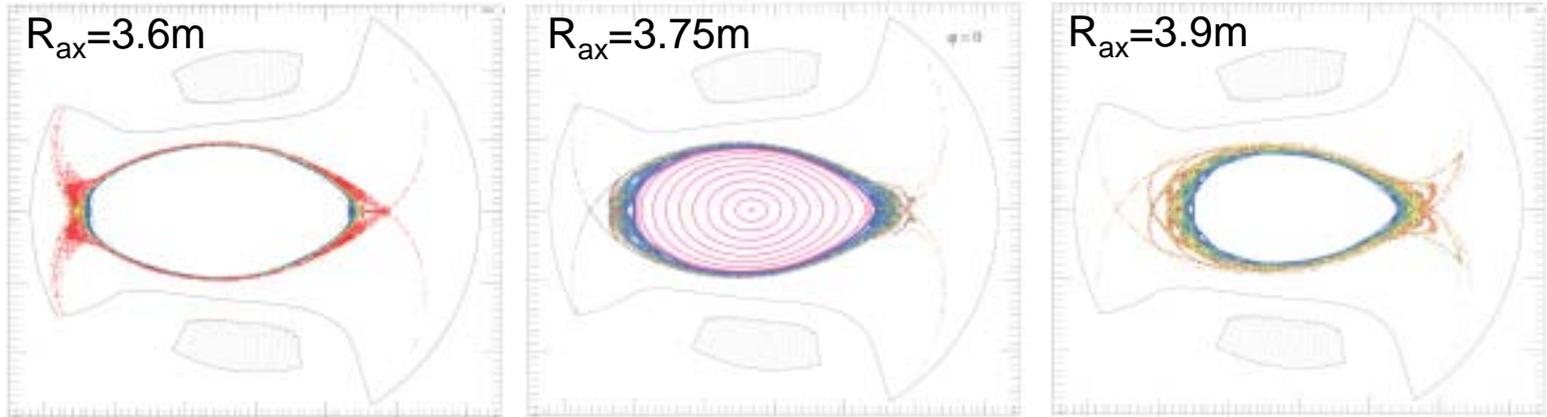
Edge magnetic structure can be divided roughly three regions.

1. Island and stochastic layer region
2. Edge surface layers region
3. Divertor

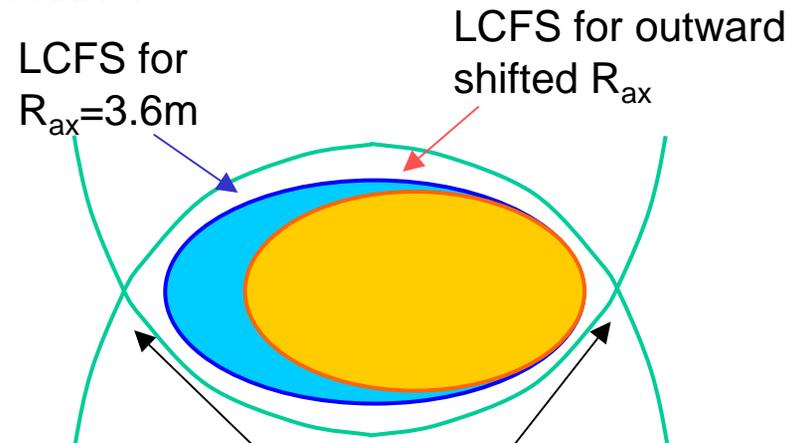


Profiles of connection length of field lines connected to a torus inboard side divertor plate.

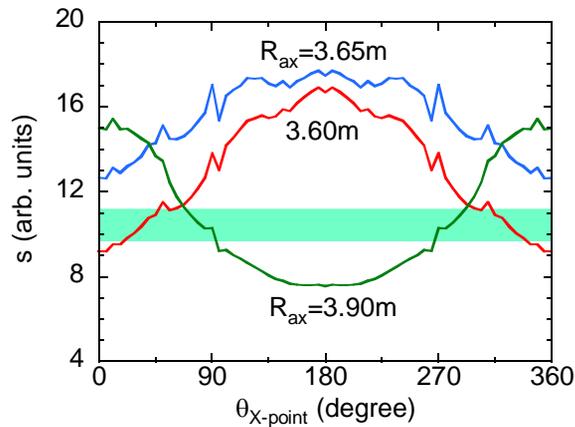
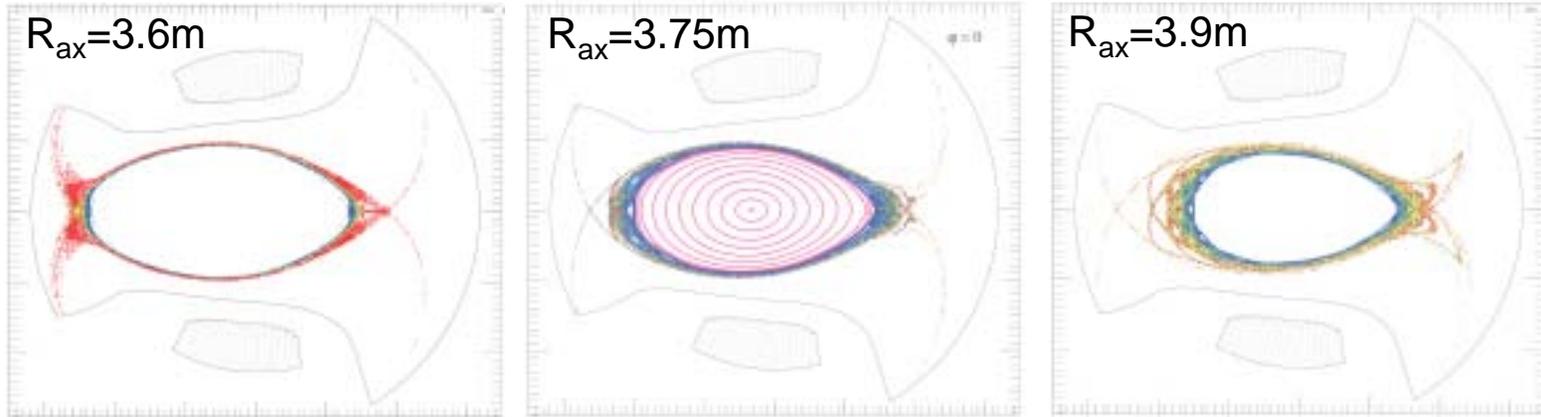




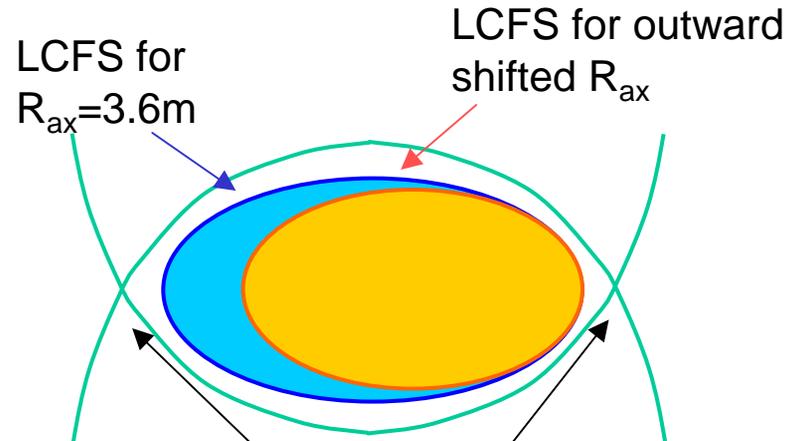
R_{ax} dependence of positions of LCFS at horizontally elongated cross-section. ($\nu = 0\%$)



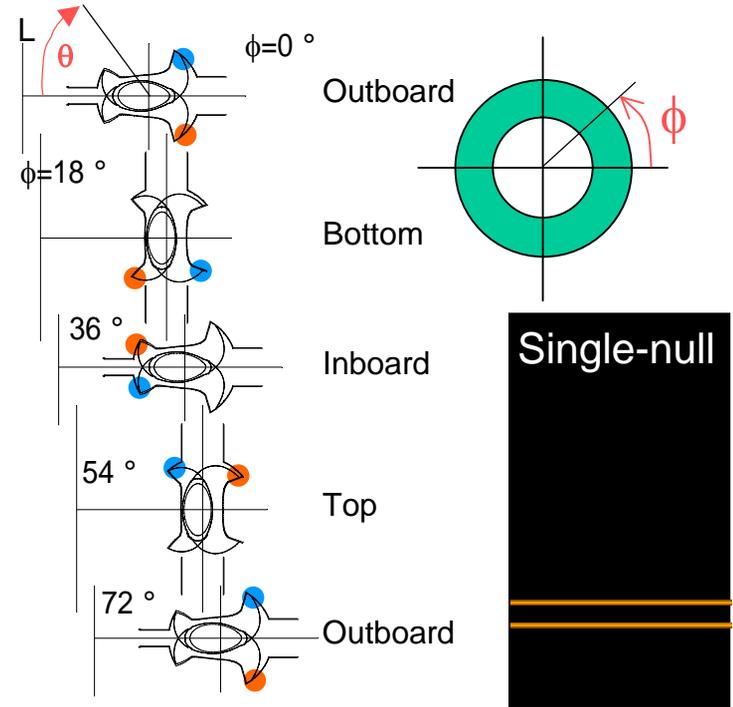
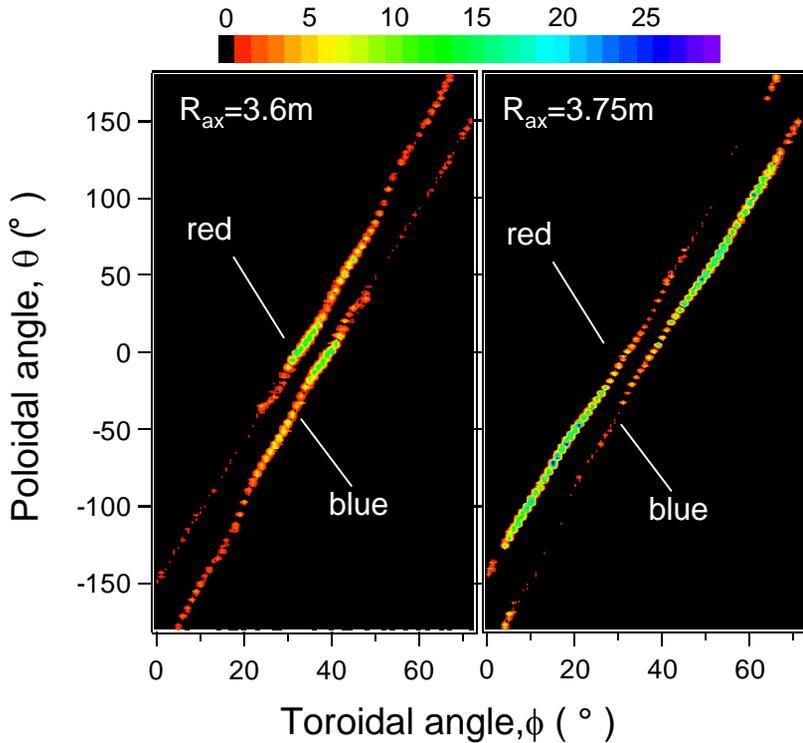
Positions of the X-points do not change largely in different R_{ax} operation. The X-points have same rotational transform as helical coils, $\nu/2\pi = 5$.



$$S = (l_{X\text{-point}} - l_{\text{LCFS}}) / (r_{X\text{-point}} - r_{\text{LCFS}})$$



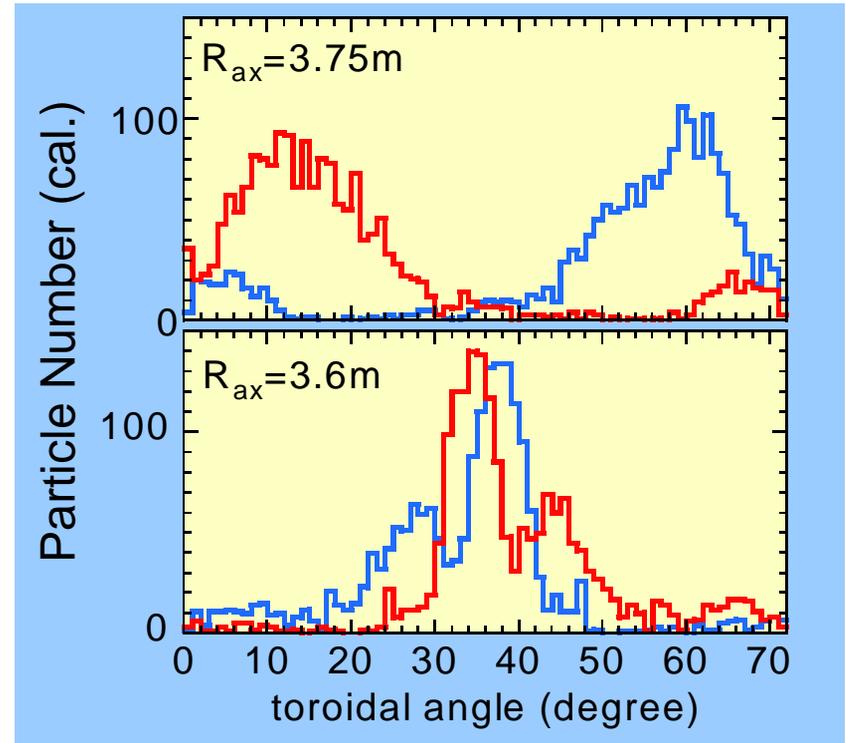
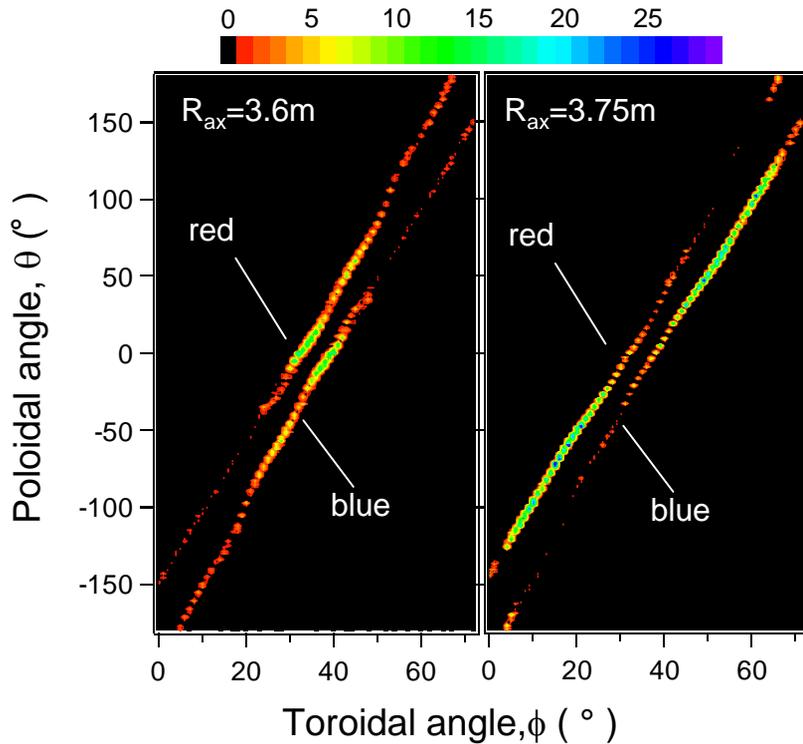
Positions of the X-points do not change largely in different R_{ax} operation. The X-points have same rotational transform as helical coils, $1/2\pi = 5$.



Profiles of Particle Deposition on the Divertor
(Calculated by T.Morisaki)

Axisymmetric divertor
in tokamaks

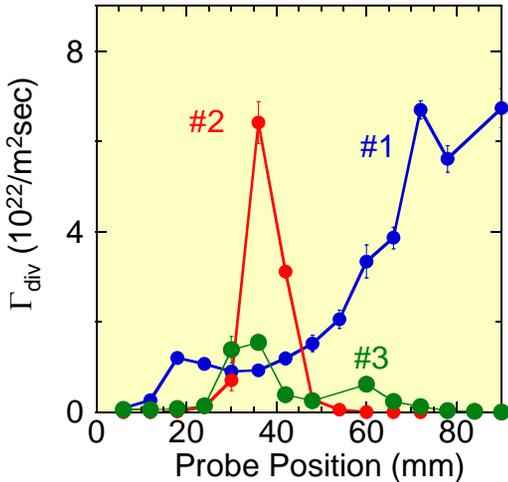
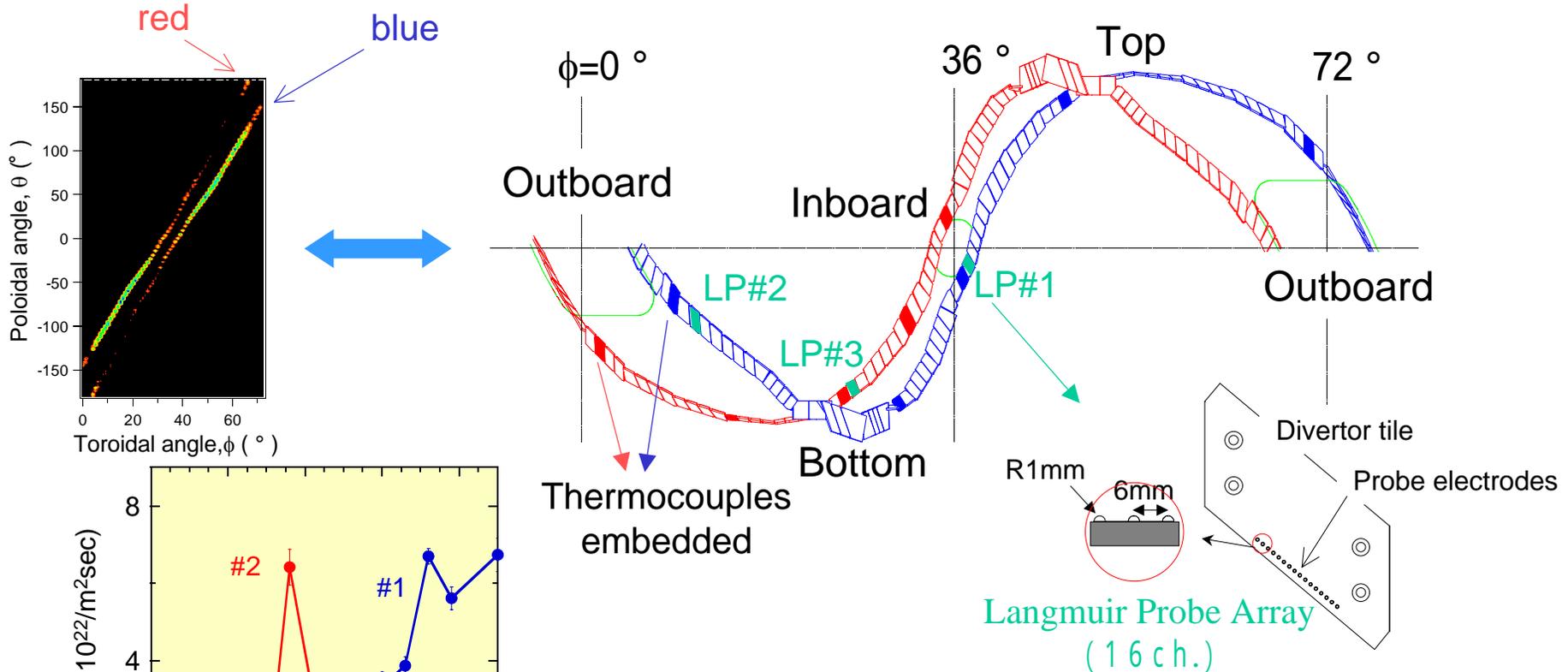
粒子拡散を模擬した磁力線追跡計算結果



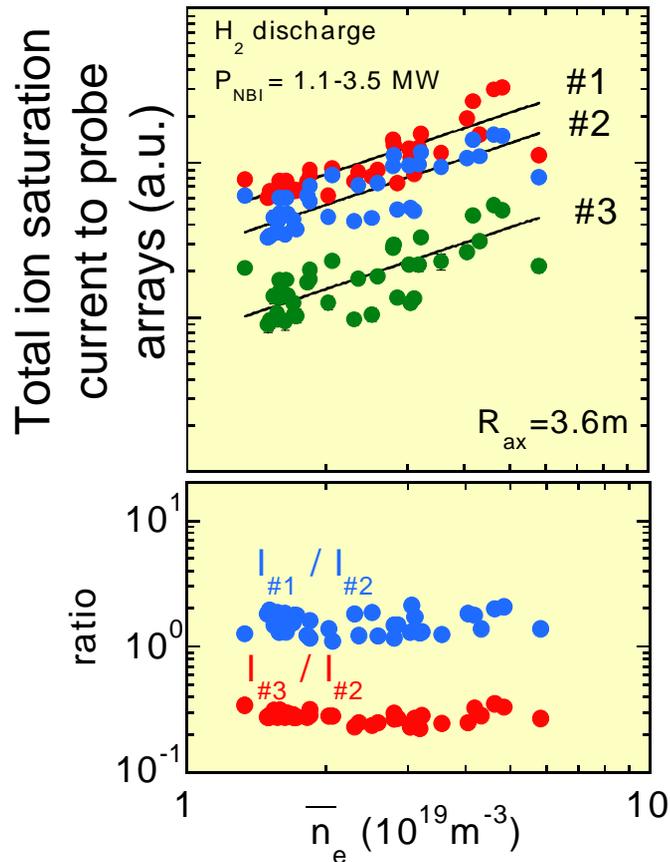
Profiles of Particle Deposition on the Divertor
(Calculated by T.Morisaki)

粒子拡散を模擬した磁力線追跡計算結果

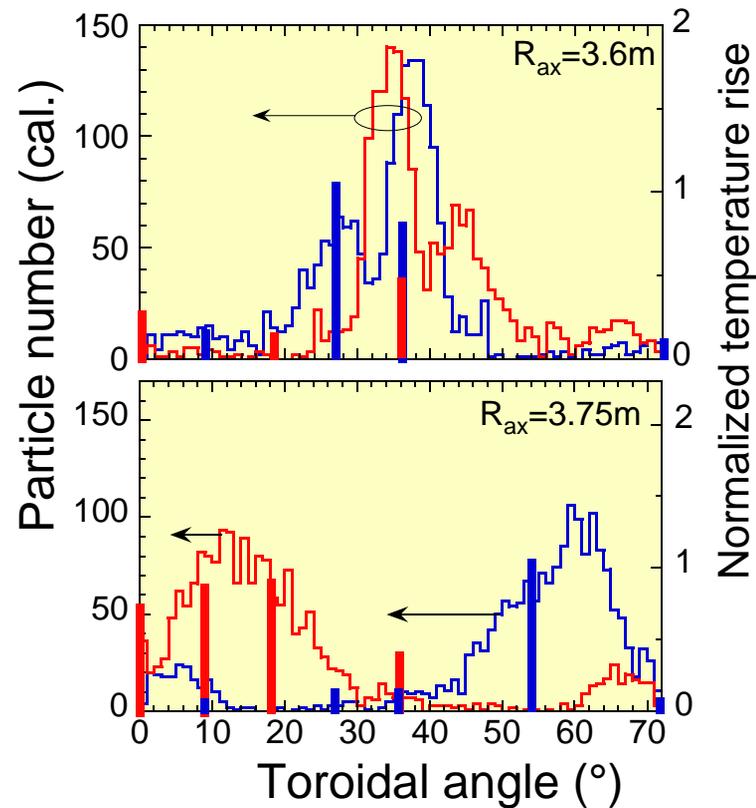
ヘリカルダイバータプラズマは不均一



Typical profiles of particle flux to #1-#3 probe array ($R_{\text{ax}}=3.6\text{m}$). The profile at #1 array is so extended and the array cannot obtain complete profile. In this R_{ax} case.

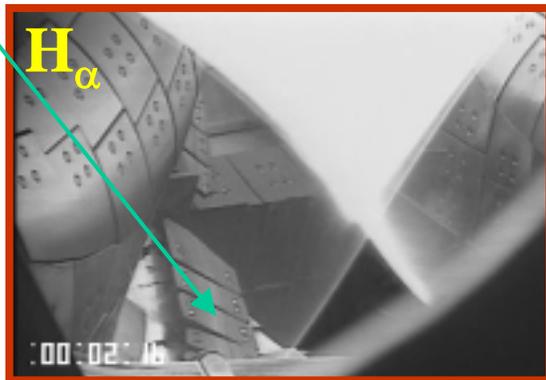


Total ion saturation current to probe arrays, and ratio of ion saturation current to #1 and #3 probe array to that to #2 array.



Profile of normalized temperature rise measured by thermocouples, and particle deposition obtained by field line tracing.

ダイバータ板

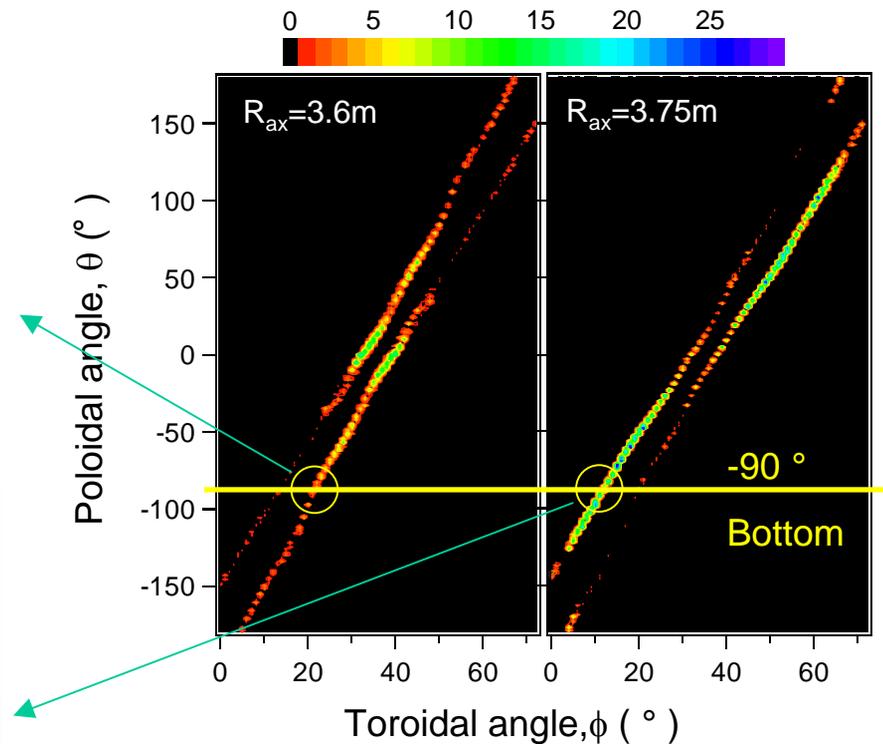
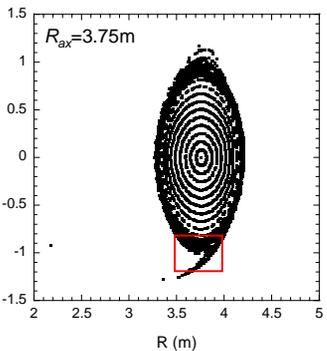
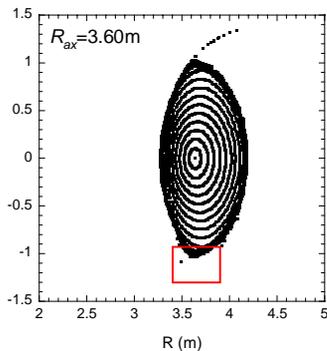


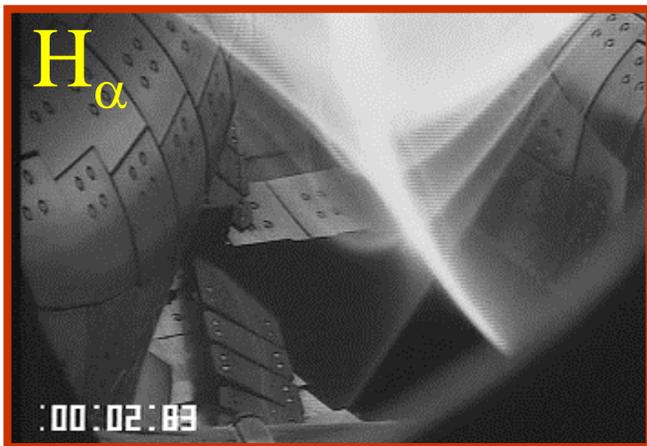
$R_{ax}=3.60\text{m}$, #28170



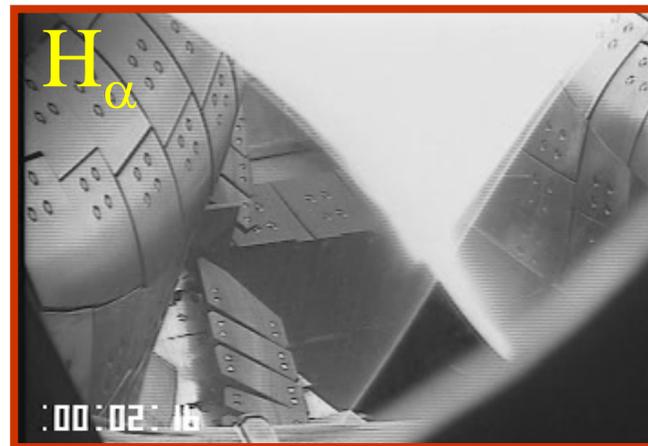
$R_{ax}=3.75\text{m}$, #27731

Photo by M.Shoji

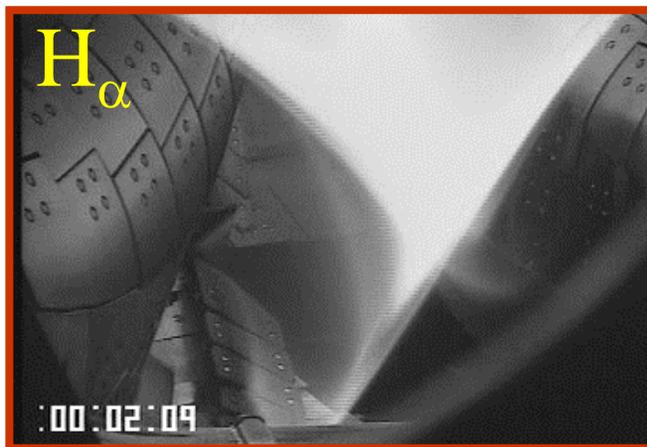




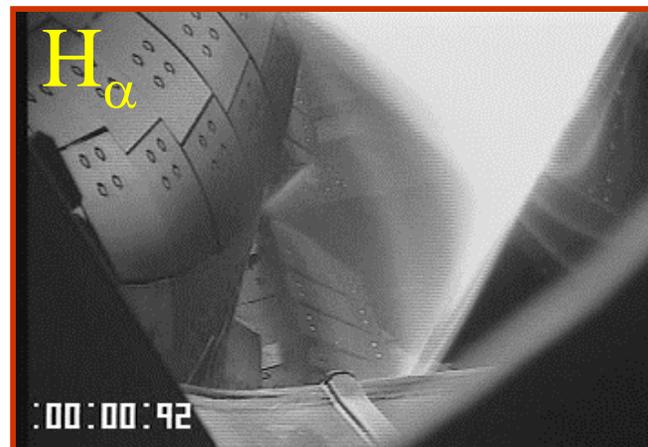
$R_{ax}=3.50\text{m}, \#26972$



$R_{ax}=3.60\text{m}, \#28170$



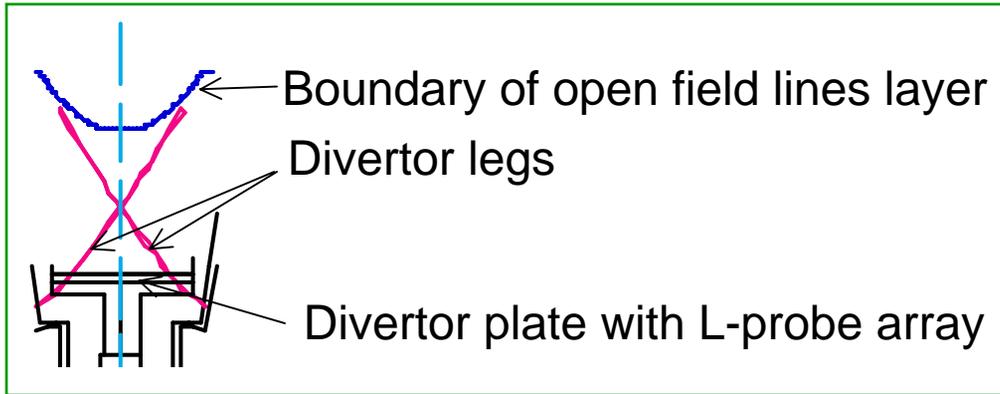
$R_{ax}=3.75\text{m}, \#27731$



$R_{ax}=3.90\text{m}, \#29987$

Photo by M.Shoji

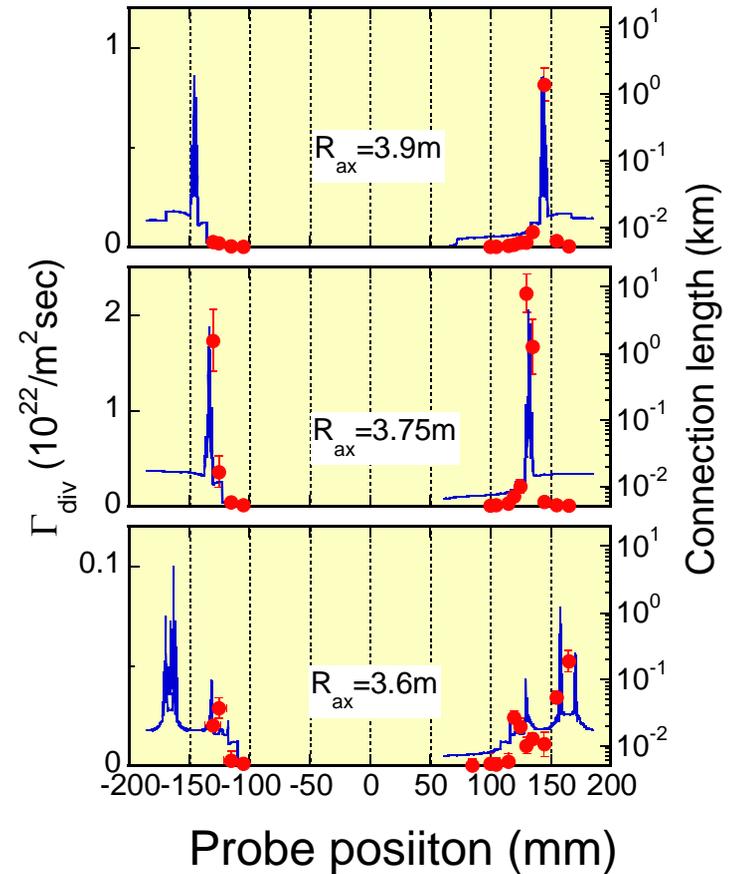
The H_{α} line emission profile near the divertor plates changes with the magnetic axis position.



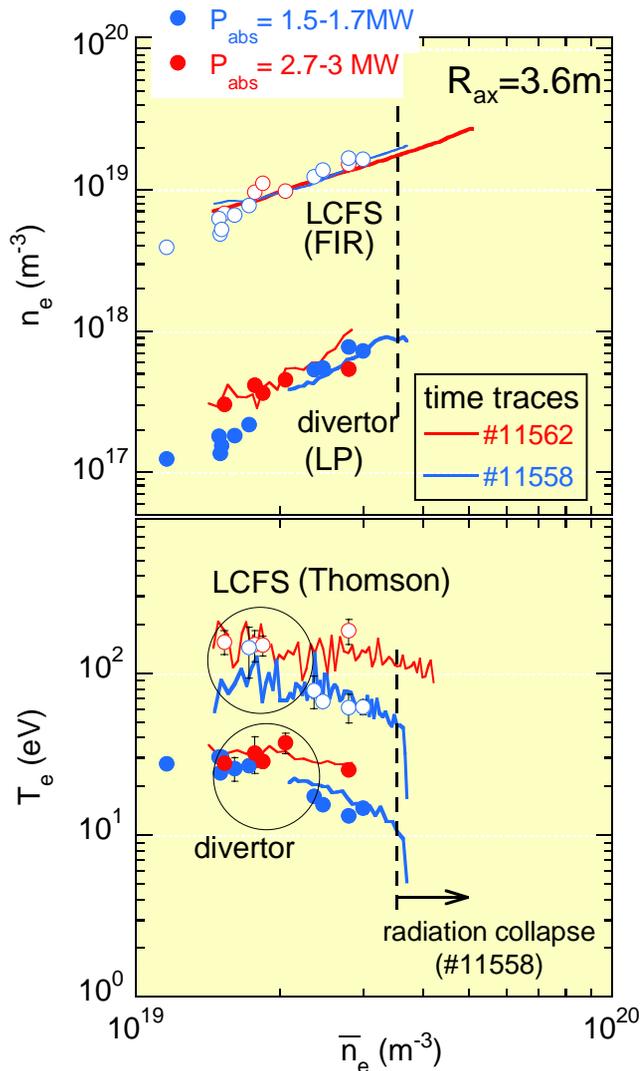
Profiles of particle flux to a divertor plate shows that the positions of Γ_{div} peaks agree with peaks of L_c profiles.

Only long field lines, over several hundred meters, approach the vicinity of LCFS.

They are the main channel of particle and heat transport from LCFS to the divertor.



Profiles of particle flux to a divertor plate at torus inboard side.



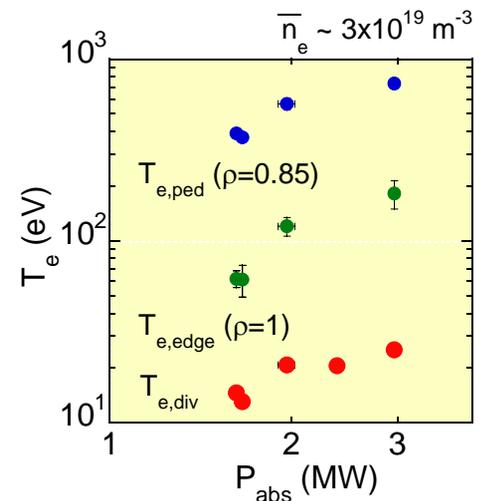
Electron density and temperature at LCFS and divertor versus line averaged density.

Both n_e and T_e decrease drastically comparing with them at LCFS.

T_e and n_e at the divertor have almost same \bar{n}_e dependences with them at LCFS.

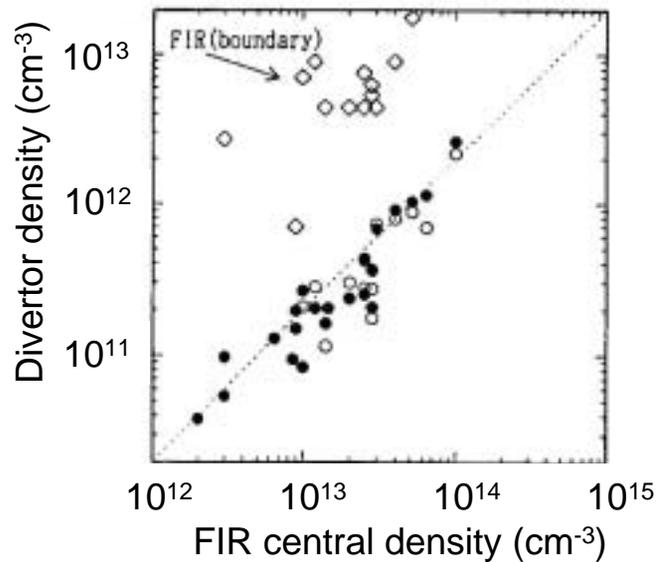
Signs of high recycling or divertor detachment have not been observed.

T_e rises with an increase of heating power. However, in the regime of $P_{abs} > 2\text{ MW}$, the increase becomes modest.



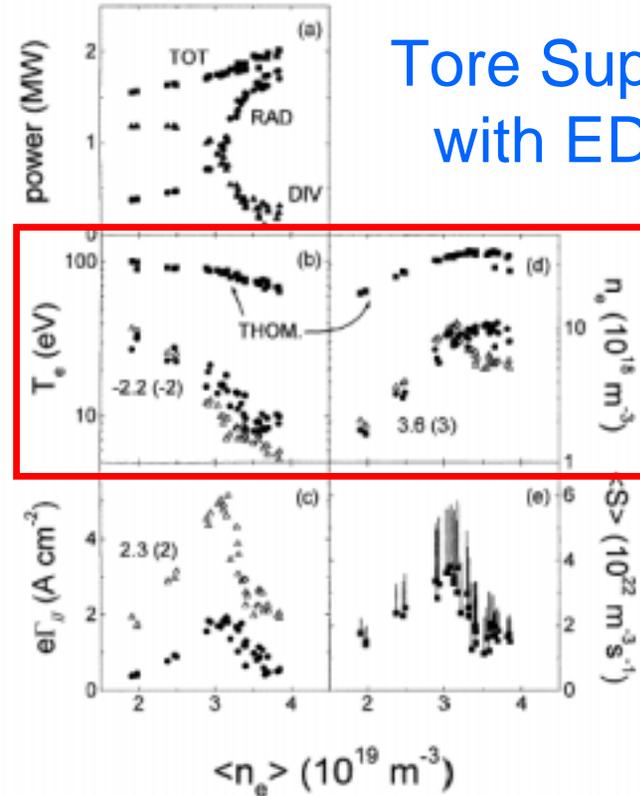
Electron temperature versus heating power

Heliotron-E

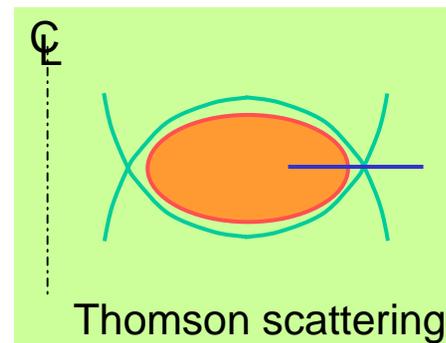
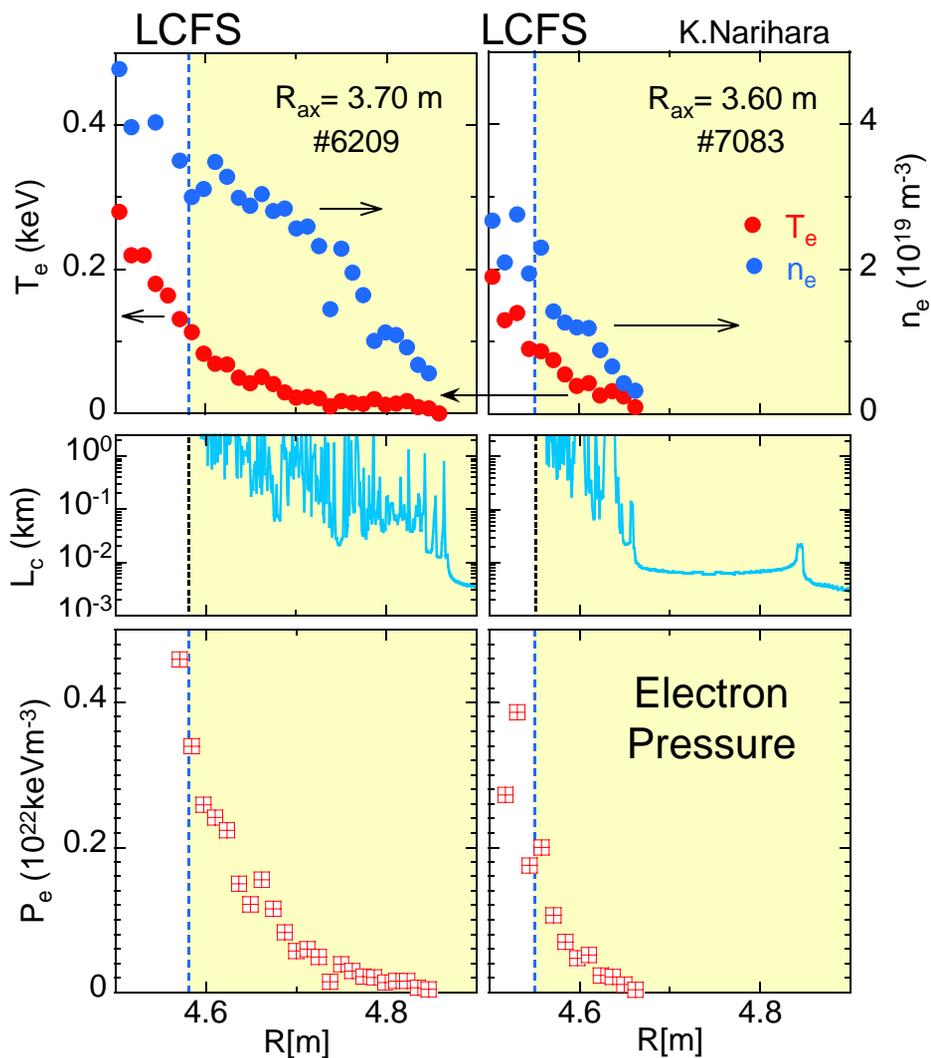


H.Matsuura, et al., Nucl. Fusion 32 (1992) 405.

Tore Supra with ED

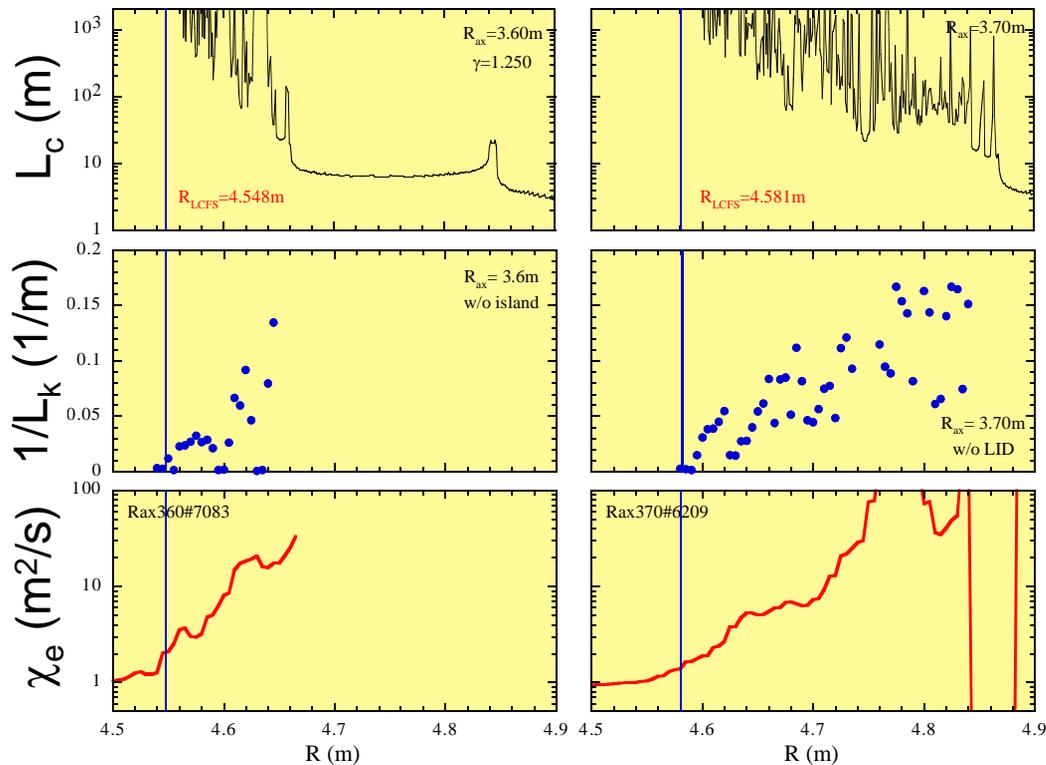


J.P.Gunn, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 41 (1999) B57.

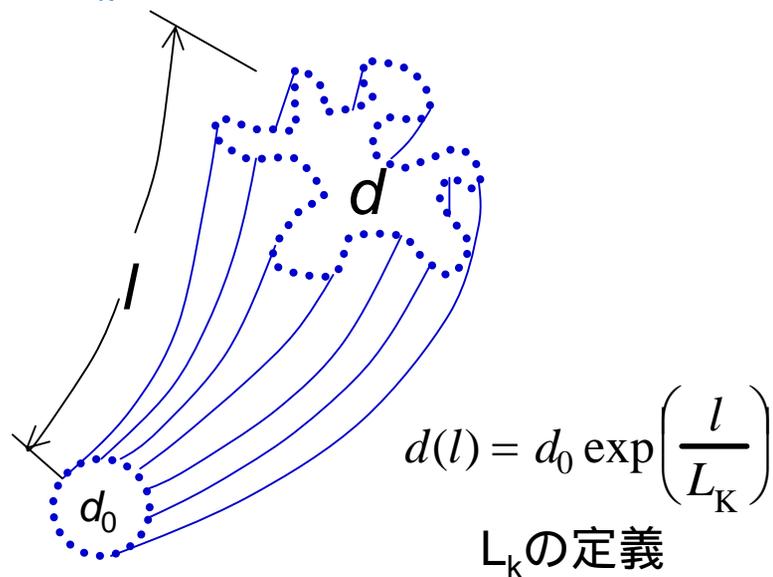


開いた磁力線領域において電子圧力は低下

T.Morisaki



統計的磁気面領域の乱雑さの指標として、Kolmogorov長(L_k)を計算
 L_k が短い 乱雑さが大きい

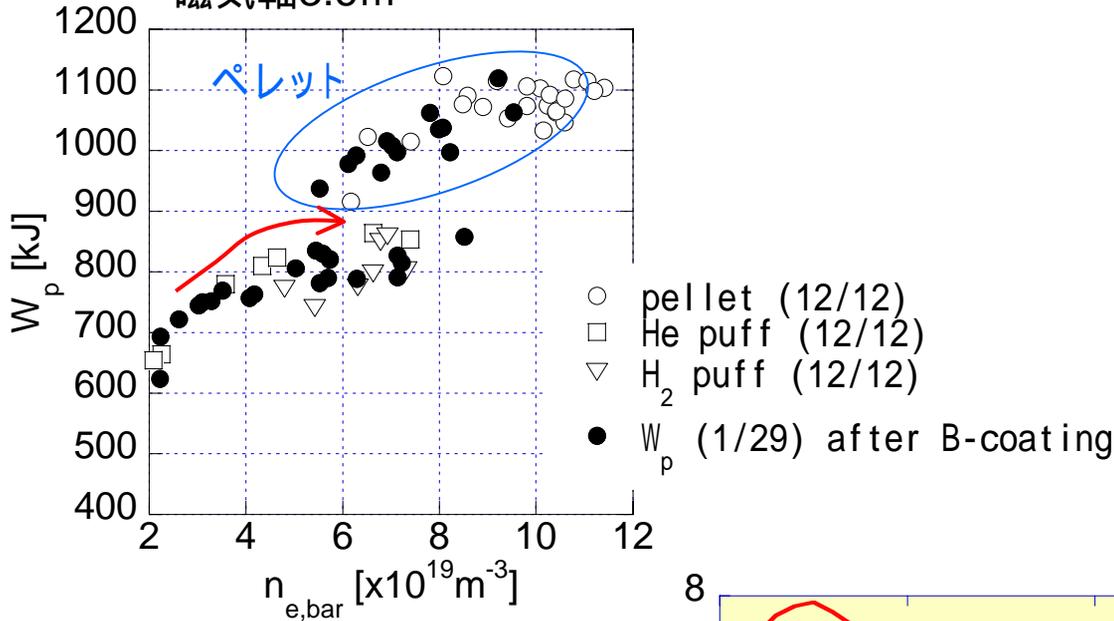


周辺部の χ_e の評価

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} n k T_e \right) = P_{abs} - P_{loss} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left(n \chi_e \frac{\partial k T_e}{\partial r} + D \frac{3}{2} k T_e \frac{\partial n_e}{\partial r} \right)$$

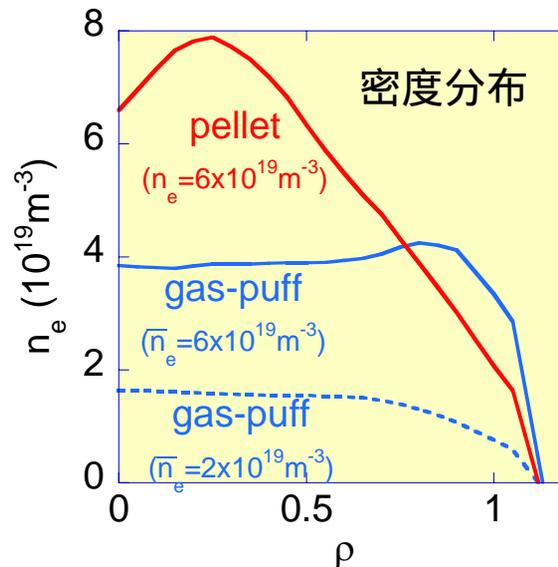
L_k と χ_e には相関がありそうである

磁気軸3.6m



ガスパフによる粒子供給では、閉じ込め性能に飽和が観測されている。

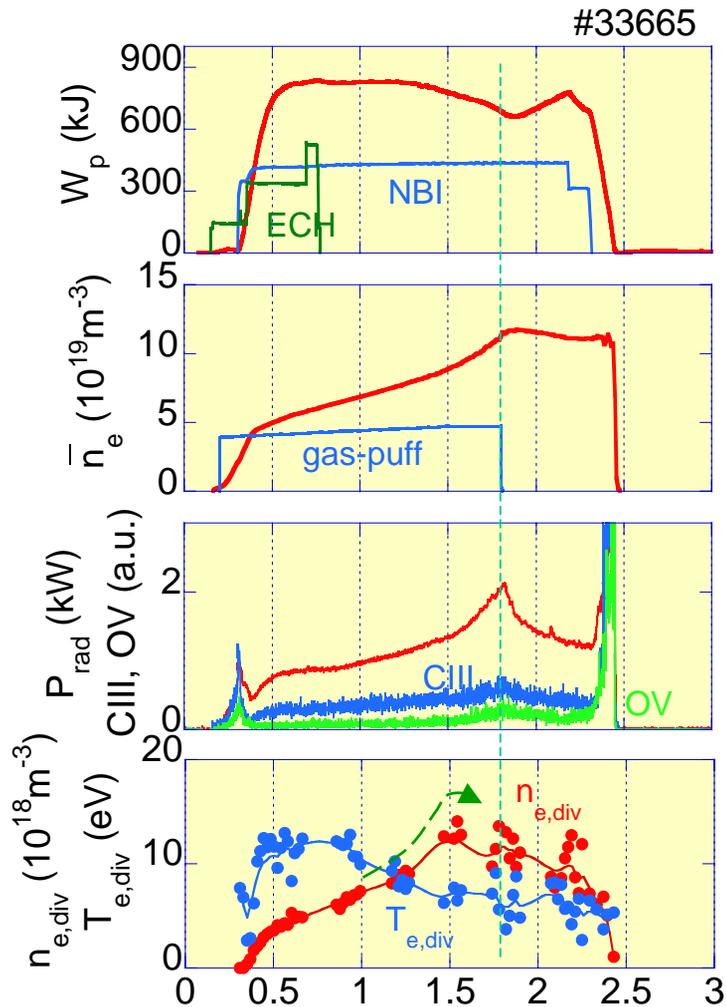
ペレットによる粒子供給の場合、より高い密度まで閉じ込めは飽和しない。



高い周辺密度による加熱吸収分布の平坦化

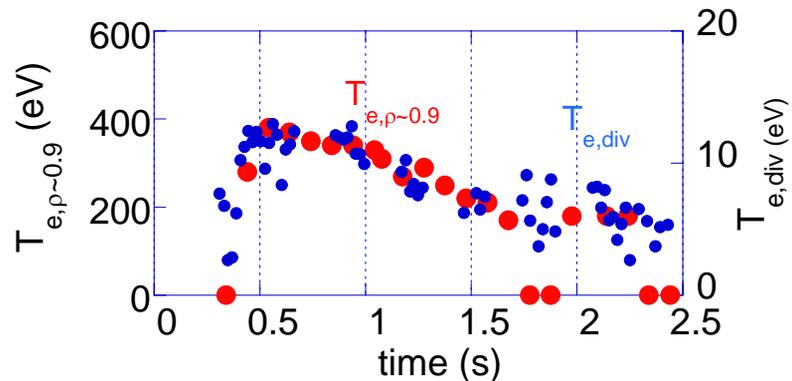


中心加熱から周辺加熱へ



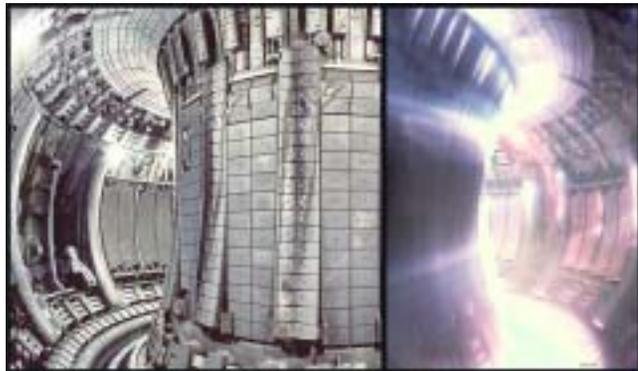
ダイバータ部電子密度に roll-over が観測された。

ダイバータデタッチメント？

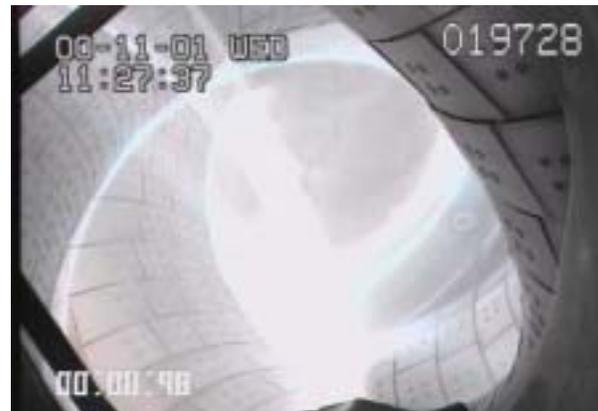


ダイバータ部電子温度と、周辺部電子温度は比例関係を保っているように見える。

CCDカメラで得られたプラズマ画像



JETホームページより



LHDホームページより

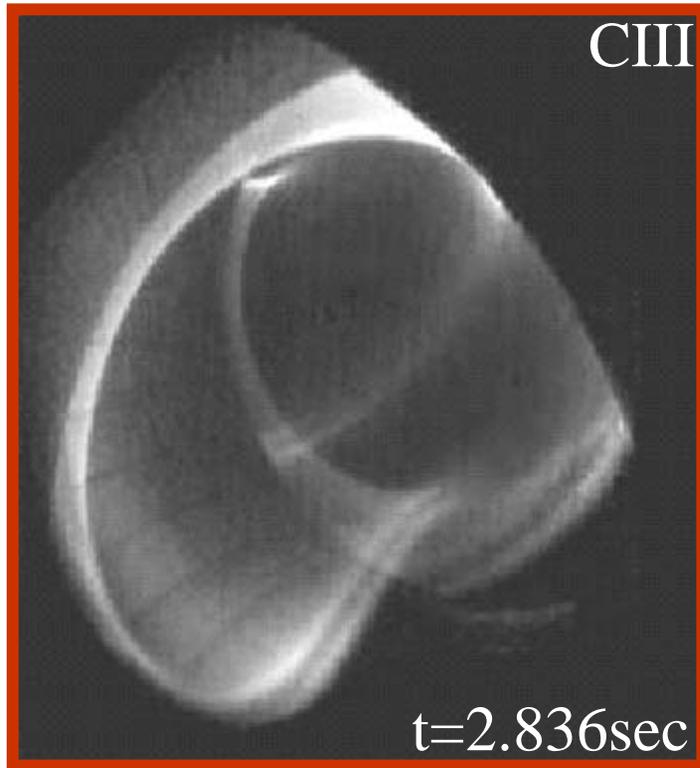
トカマクの場合

ダイバータ領域に強い発光

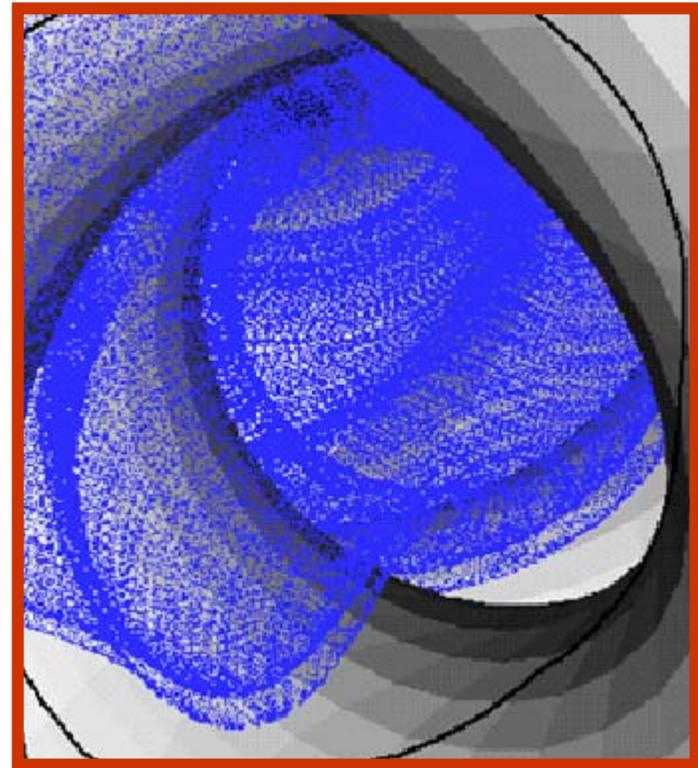
LHDの場合は？



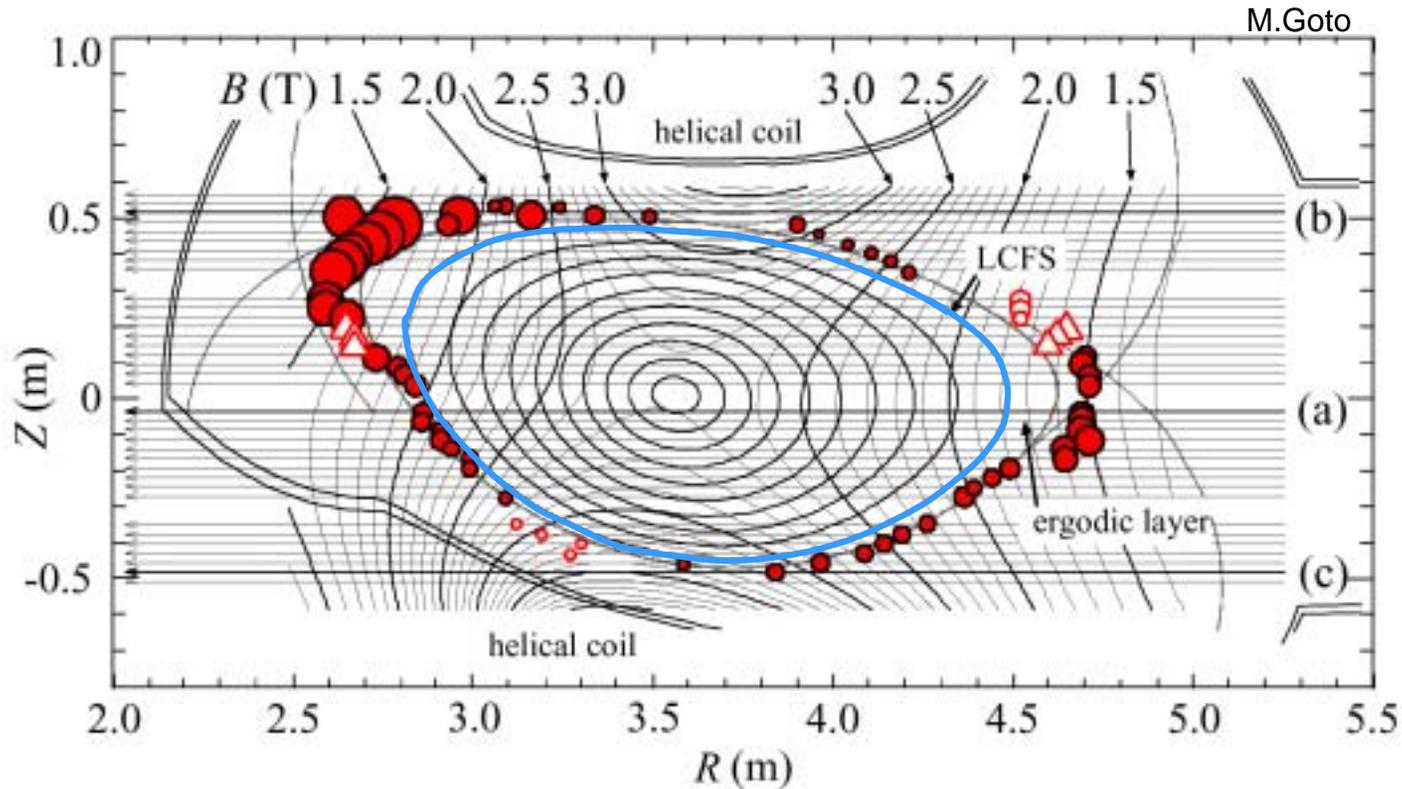
Measurement



Calculation



計算とCCD画像の比較から、LHDの場合おおざっぱには、**開いた磁力線領域全体が発光している**と言える。

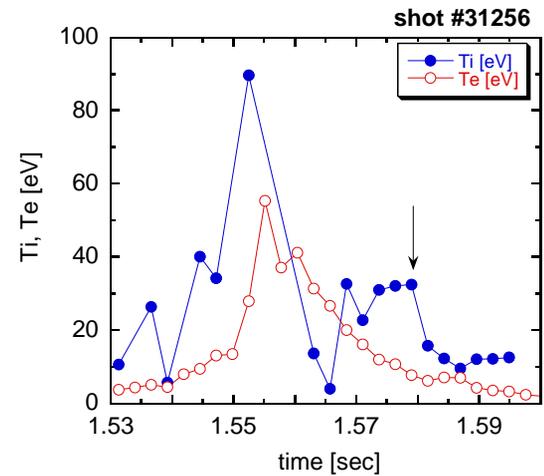
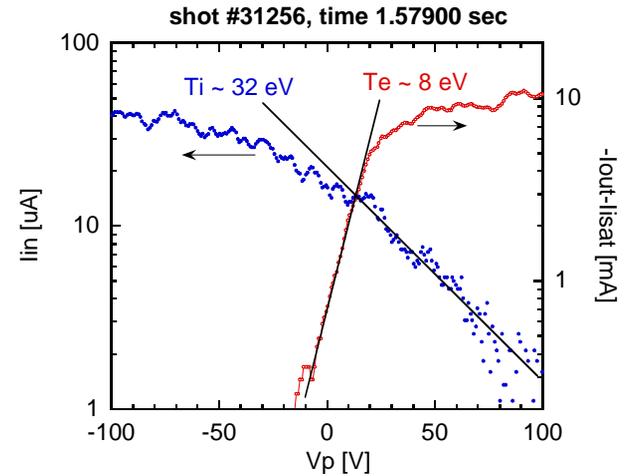
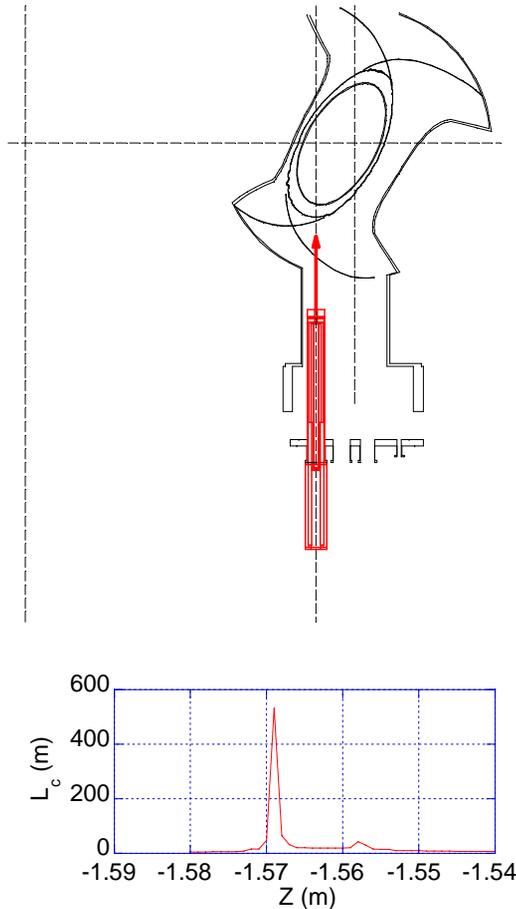


ゼーマン効果を利用し、主たる発光位置を特定 主たる電離領域を特定

開いた磁力線領域の外側、特にX点近傍が主たる電離領域になっている。

ダイバータ領域ではない。

最外殻磁気面から離れた領域に粒子源。



勝又プローブ (ion sensitive probe) による計測 (長野高専 江角氏)

・初期的なデータ解析が行われつつある。



まとめ 1



ヘリカルダイバータ配位の複雑な周辺磁場構造と、プラズマ特性の関係について研究を進めている。

- ・磁力線追跡計算による、ダイバータへの粒子デポジション分布、ダイバータ板上の粒子束分布予測は、計測結果と定性的に一致している。
- ・ダイバータ部の電子密度・温度は最外殻磁気面近傍の値に比べて大きく低下
- ・磁力線構造が熱・粒子の輸送に大きく影響している。
- ・高リサイクリング、ダイバータデタッチメントは観測されていない？
- ・燃料粒子、不純物発光は、ダイバータ領域よりも開いた磁力線領域の外周で強い。

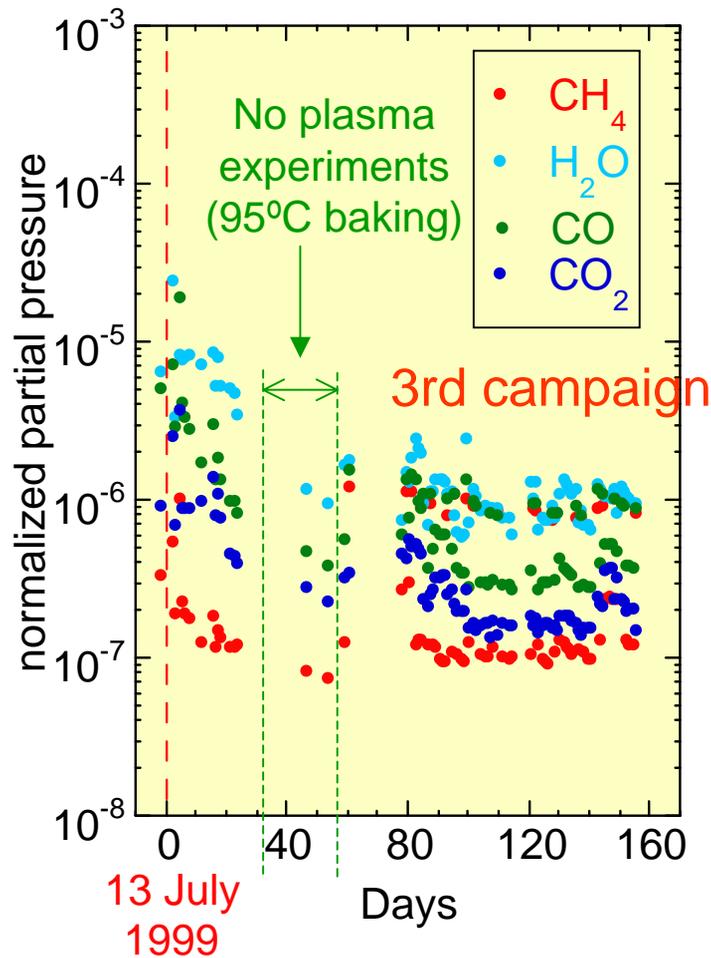
ダイバータ部での遮蔽効果は小さい



発表内容



1. はじめに ~ LHDの紹介と本発表のスコープ ~
2. 周辺及びダイバータプラズマ
3. **プラズマ・対向壁間相互作用**
 - ・ **LHDにおける壁コンディショニング**
 - ・ **プラズマ対向壁の損耗と再堆積**
 - ・ **第一壁構成材料の挙動**



壁温度の制限 95 (コイル励磁時 75)

高温ベーキングはできない。

LHDの壁コンディショニング

95 の低温ベーキング

放電洗浄(グロー放電、ECR放電)

チタンコーティング

ボロンコーティング(2001年度実験から)

3分に1回の主放電(3秒程度)も効果あり

40実験日程度で最終状態に落ち着く

Normalized partial pressures of impurity gases during G-DC

#11548 ~ Ti gettering
(真空容器壁の10%)

#11782 ~ Ti gettering
(真空容器壁の25%)

コンディショニングの進展

酸素不純物の減少

炭素不純物は酸素不
純物程は減少せず。

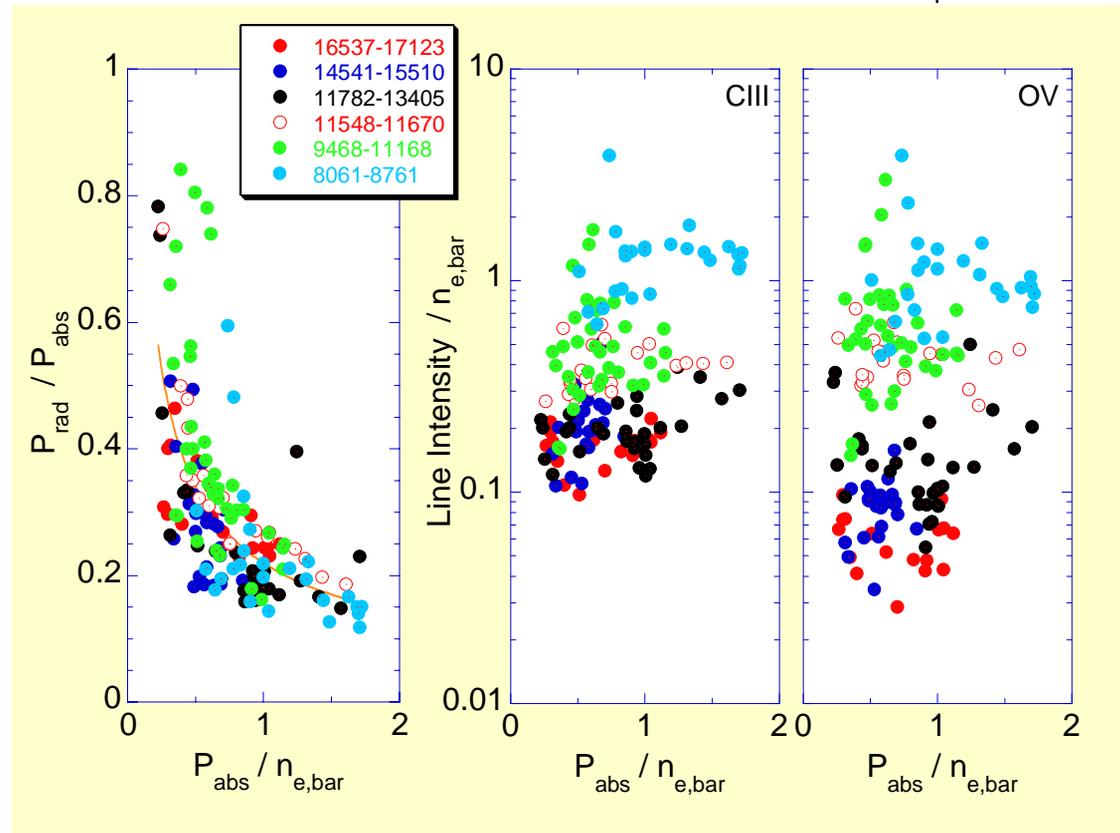
吸収パワに占める放射損失の
割合はコンディショニングの進展
に大きく依存せず。

ある程度温度が上がっ
てしまえば軽不純物
の放射は影響が小さ
い？

ペDESTAL温度を制
限している可能性？

放射強度分布との整
合性？

水素放電、 $B_t = 2.75T$ 、 $R_{ax} = 3.6 m$ 、 $W_p > 150 kJ$





ボロニゼーション



目的: **軽不純物の低減**
第一壁(SUS316)へのボロン被覆による、金属不純物の抑制

方法:

・グロー放電中に**ジボランガス**(B_2H_6 10% He希釈)を導入

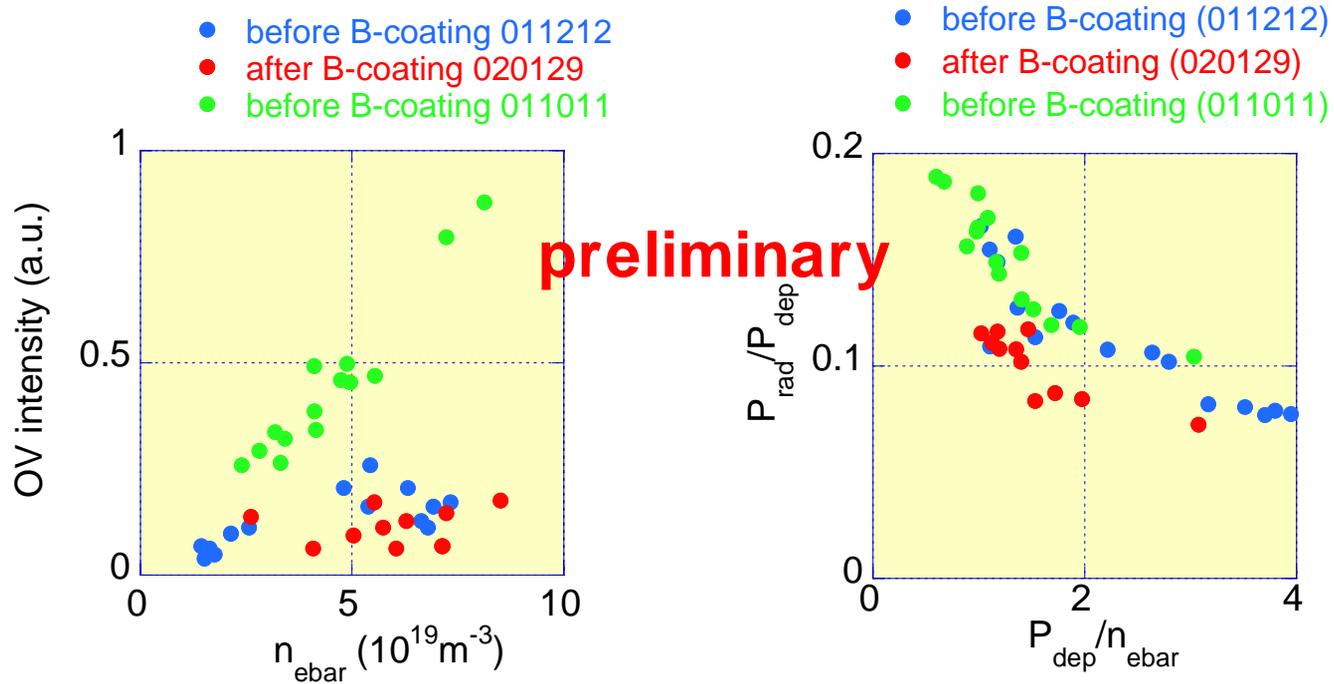
・導入口は**1ヶ所**

ボロンで被覆されるのは、プラズマ対向面表面積の概ね30%程度

今年度実験におけるボロニゼーション実施状況:

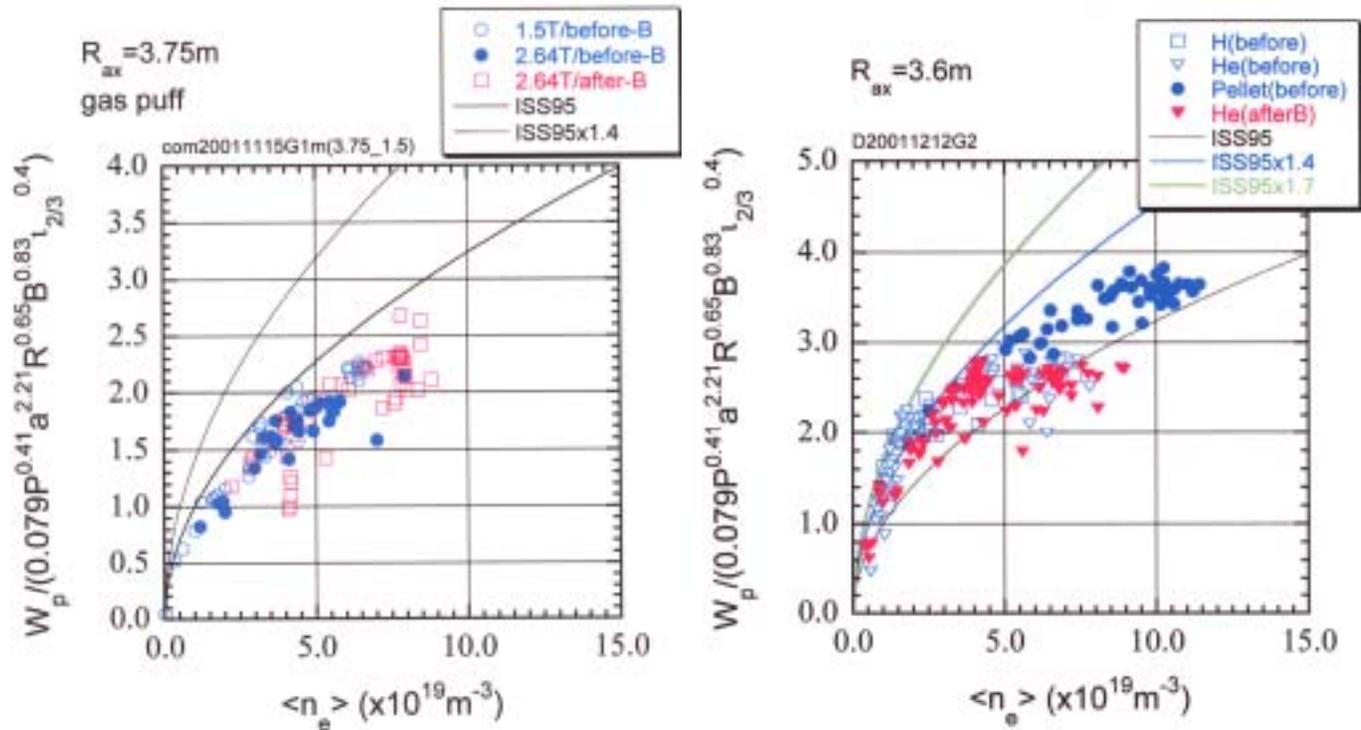
・第1回目 2002年1月12日 200sccm 6時間 ~ 20nm程度の膜厚

・第2回目 2002年1月28日 300-380 sccm 7時間 ~ 40nm程度の膜厚



- ・酸素の低減
- ・放射損失の低減 が得られた。

運転密度領域の拡張



ジボラン導入口の増設

ボロン被覆率の増大
より明確な効果を期待

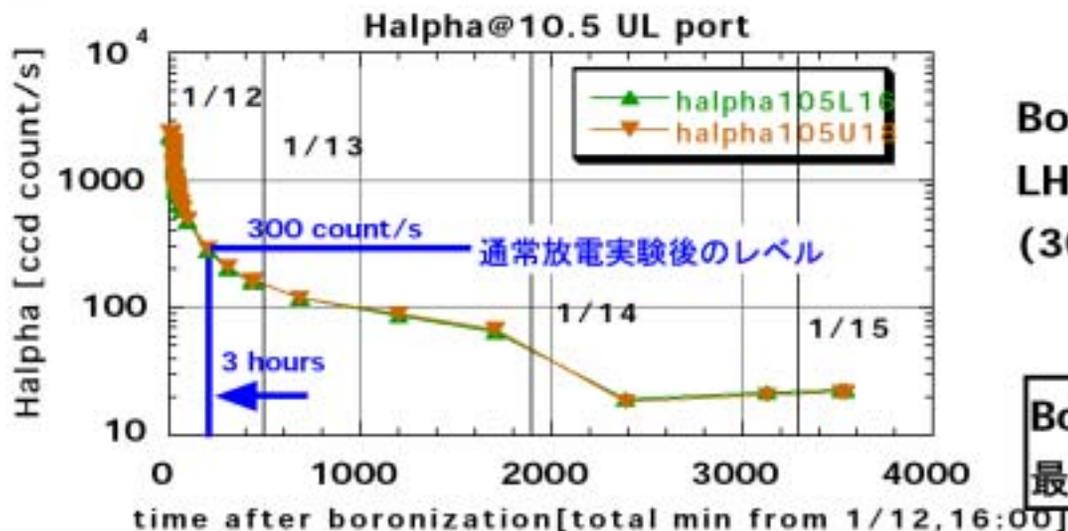
Boronization 後のHe Glow Discharge Cleaningの効果

東大高温プラズマ 門 信一郎

- LHD-CXS用 10.5UL(Glow電極有),7.5ULポート(Glow電極無)
- 50cm-Czerny Turner 分光器(1800 line/mm, f/5, slit 100um)にてH α 計測

露光時間で規格化したH α 光 (B-H膜から脱離した水素の解離生成物) の測定値の時間変化 (冷却CCD検出器(CXRS用)の積分時間は10s-60s)

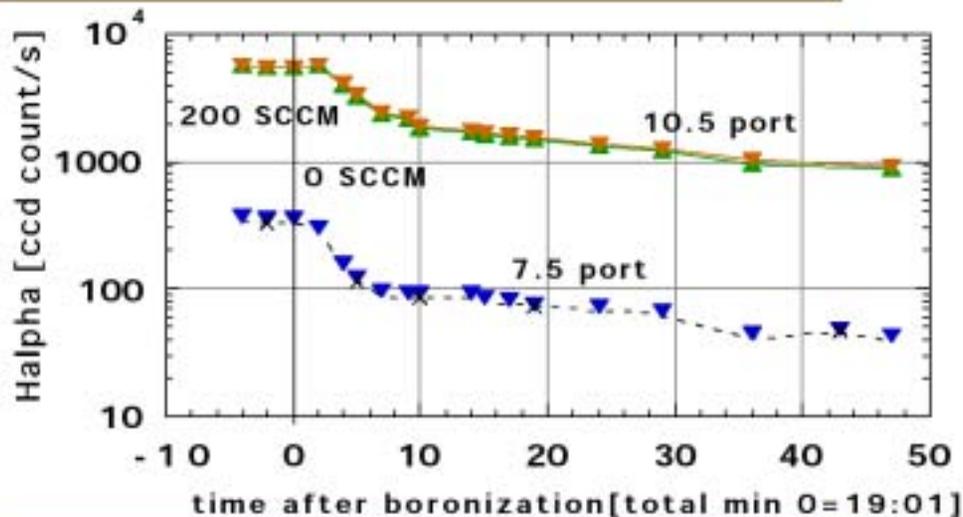
GDC after Boronization 2002/01/12-15



Boronization後3~4時間で通常のLHD主放電実験後のレベル(300[count/s])まで下がる。

Boronization後のHe-GDC
最適時間3-4時間

GDC after Boronization 2002/01/28

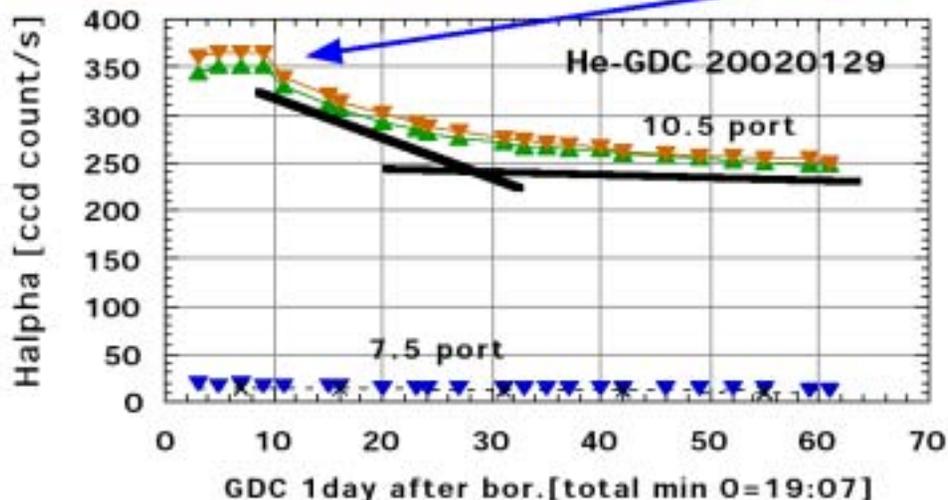


1/28 のBoronization後のHe-GDCは50分程度であり $H\alpha$ は6000- \rightarrow 900 [count/s]までしか下がっていない



しかし・・・

GDC after Ordinary Exp. 2002/01/29



●1/29のLHD実験後He-GDC開始時には350[count/s]程度まですでに下がっている。

●通常のGDCとかわらない。
(左図より日常のGDCは30程度でよい・・・GDCの短縮化・・・余談)

●ポロン膜からHを” 涸らす” には主放電(He)も” けっこう” 役にたつ。

After the 3'rd campaign in 1999 (shot # 7120 - 17311)

B_{div} field lines at this tile are near normal incidence.

There are many colored lines in visible photo.

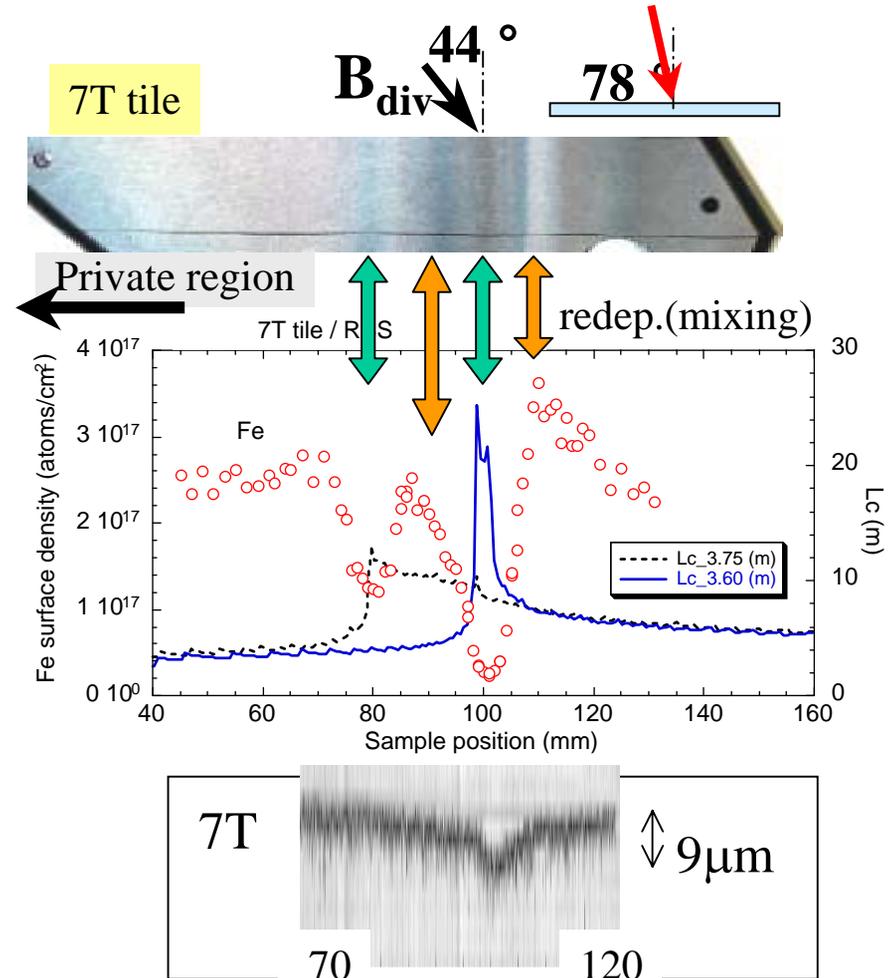
Fe deposition is mainly due to every night GDC of the total 2,300 hrs.

Two distinctive traces correspond to $R_{ax}=3.6$ and 3.75 m (17% of all shots).

Eroded depth is $\sim 9\mu\text{m}$

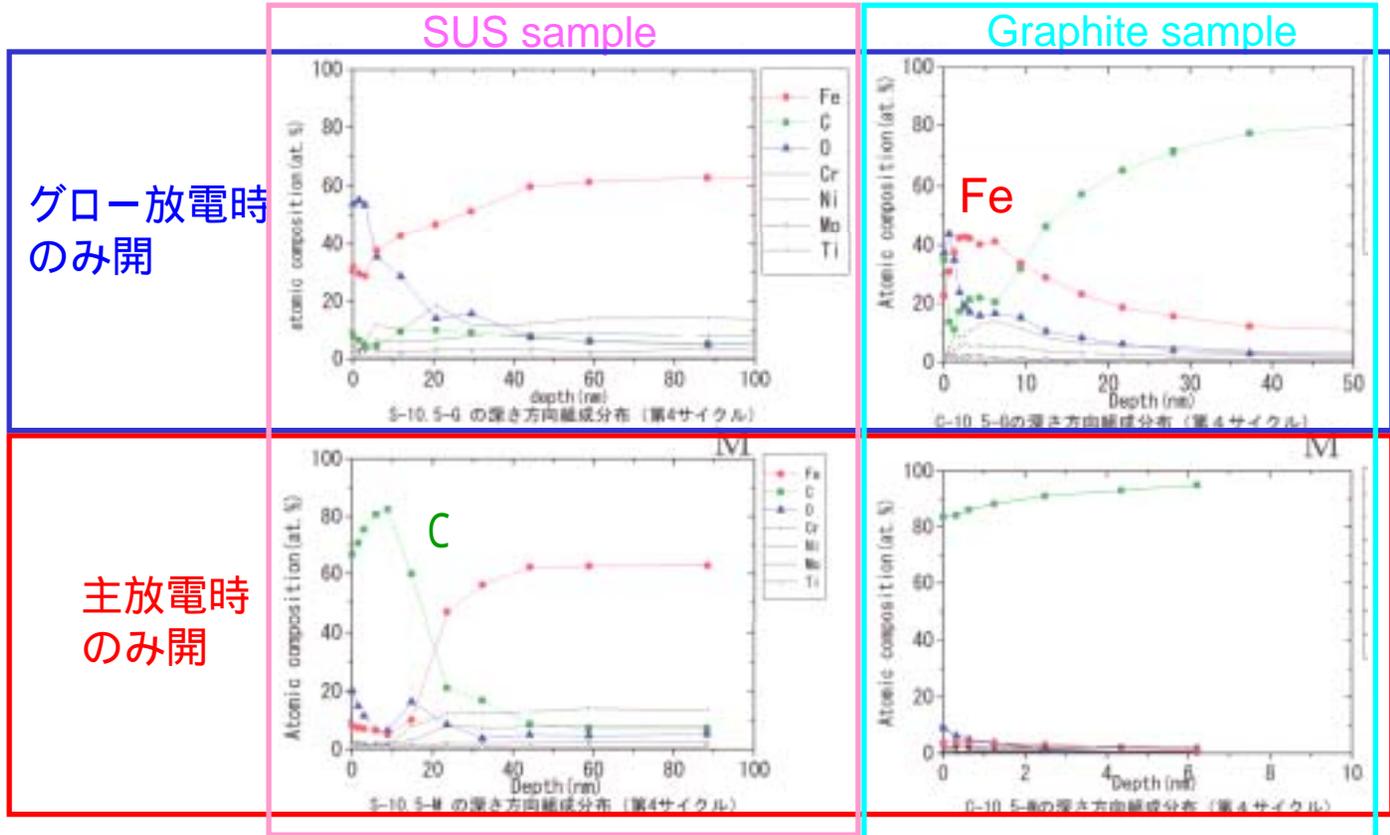
$T_{div} \sim 20\text{eV}$, $n_{div} \sim 5 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$, $\Gamma_{div} \sim 2 \times 10^{22}\text{m}^{-2}\text{s}$
 Tile temp. $< 370\text{K}$ by IR-TV

S.Masuzaki et al, J. Nucl. Mater. 290-293 (2001) 12.



真空容器内に材料サンプルを設置
 実験サイクルを通した第一壁材料の挙動を解析(北大 信太、広畑、日野)

グロー放電時には、
 第一壁材料である
 SUS316の主構成
 物質である鉄が、
 主放電時にはダイ
 バータ板材料であ
 る炭素が、それぞ
 れ主たる堆積物



シャッター付き材料サンプル上の堆積物解析例
 (サンプル位置 10.5Lポート底部)



まとめ 2



壁コンディショニング

- ・低温ベーキング、放電洗浄、表面コーティング(チタン、ボロン)により実施
- ・今年度実験終盤(壁の状況は落ち着いていると考えられる)にボロニゼーションを実施
酸素、放射損失の低下。

運転密度領域の拡張

- ・グロー放電中の分光計測により、ボロン膜からの水素除去のために十分なグロー放電洗浄時間を評価

ダイバータ板損耗、表面分析

- ・ダイバータプラズマにさらされる位置と、それ以外の位置で明確な違い
ダイバータトレース上：鉄の堆積少。ダイバータ板の損耗
上記以外：鉄の堆積 構造性あり。

第一壁材料挙動

- ・グロー放電中は第一壁構成材料である鉄の堆積が、主放電中はダイバータ板材料である炭素の堆積が主である。