

トカマクおよびヘリカル型装置の周辺プラズマ における間欠的な密度揺動特性

Intermittent Fluctuation Property of Edge Plasma
in Tokamak and Helical Device

三好秀暁¹、大野哲靖²、高村秀一¹、上杉喜彦³、V P Budaev⁴
朝倉伸幸⁵、三浦幸俊⁵、増崎 貴⁶、小森彰夫⁶

1. 名古屋大学大学院工学研究科
2. 名古屋大学理工科学総合研究センター
3. 金沢大学大学院工学部
4. クルチャトフ研究所
5. 日本原子力研究所那珂
6. 核融合科学研究所

背景

周辺プラズマ領域における熱・粒子輸送

プラズマ中に発生する様々な不安定性に起因する揺動

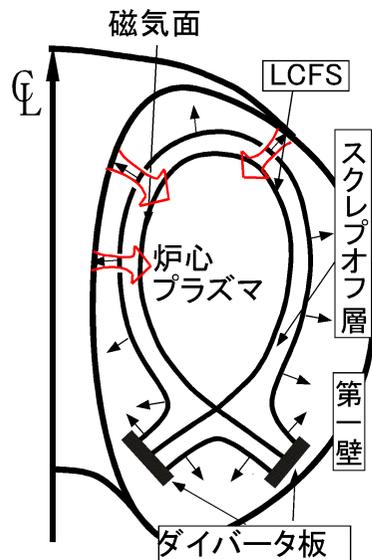
⇒ 新古典理論に基づく輸送を上回る大きな拡散（異常輸送）

⇒ 磁力線を横切る方向の輸送が増大するために
プラズマの閉じ込め性能が劣化



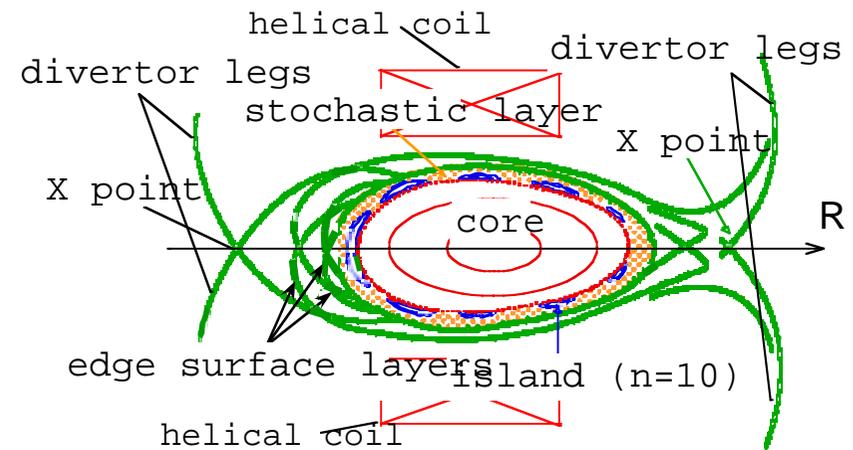
磁場配位と輸送

プラズマ中の揺動は磁場構造に影響



トカマク型装置の断面磁場構造

軸対称であり比較的単純

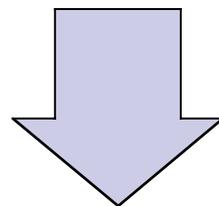


ヘリカル型装置の断面磁場構造

非軸対称で複雑

目的

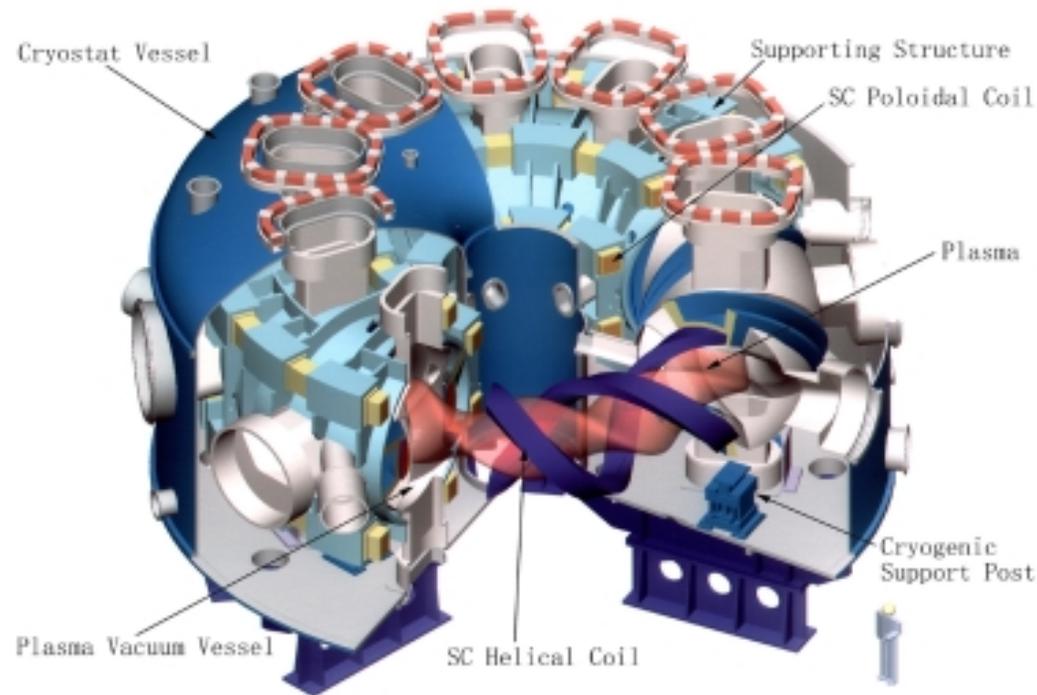
トカマク型装置 ... JT-60U
ヘリカル型装置 ... LHD



トカマク型、ヘリカル型装置において観測された揺動の統計的特性を求め、磁場構造による特性の違いを評価する。

大型ヘリカル型装置LHDにおける 揺動特性

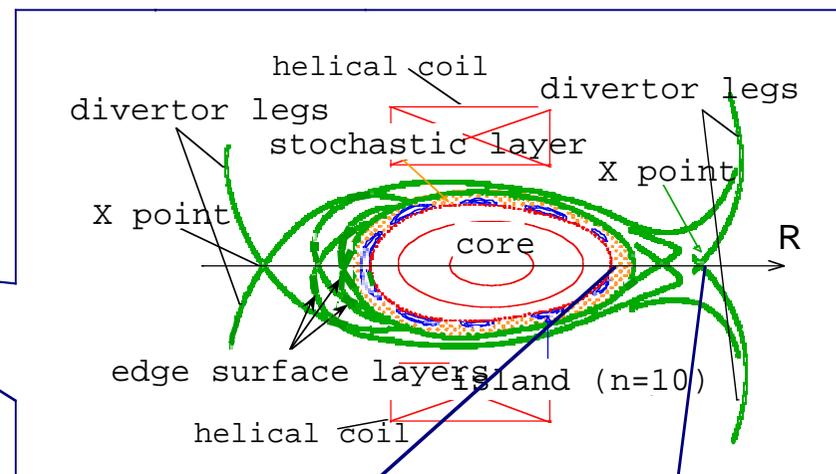
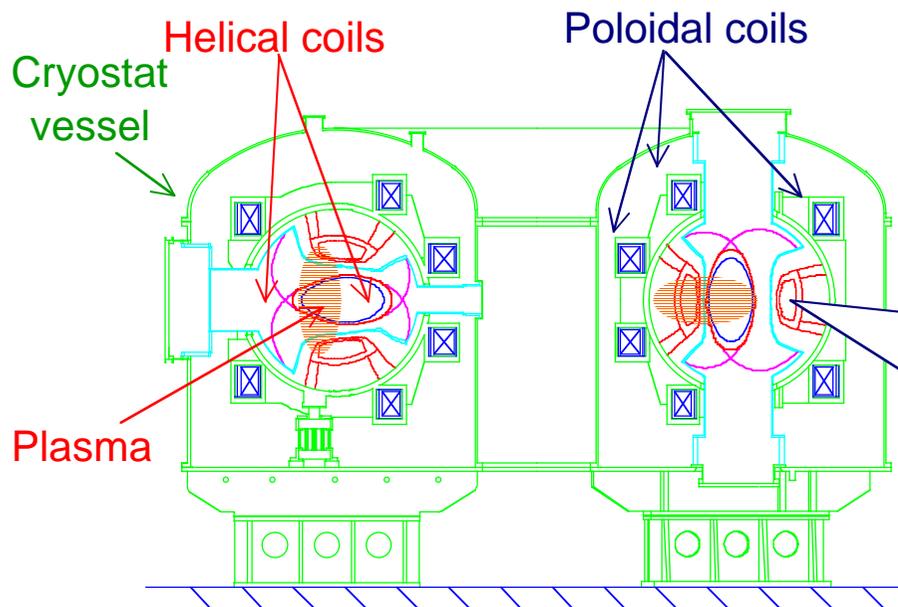
大型ヘリカル型装置LHD



Specifications of LHD (2002)

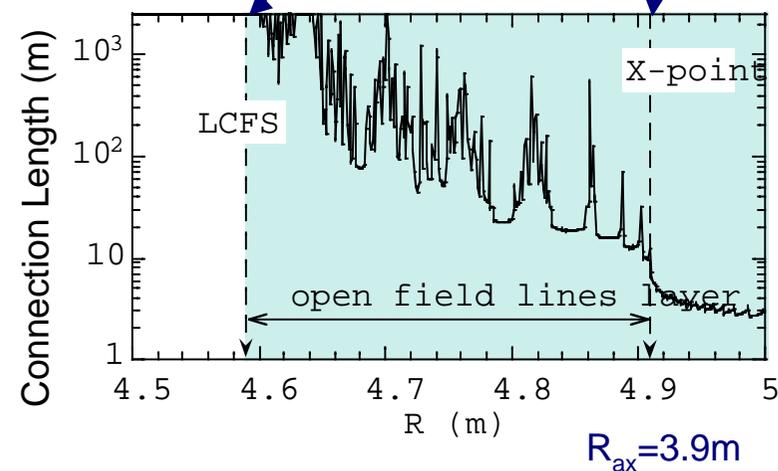
Plasma Major radius	3.5 – 4.0 m (mainly 3.6m)	Heating power	
Plasma Minor radius	~ 0.6 m (average)	ECH	2.1 MW
Plasma Volume	~ 30 m ³	N-NBI	10.0 MW
Coil minor radius	0.975 m	ICRF	2.4 MW
Magnetic field	~ 2.9 T (at R _{ax} =3.5m)		

LHDの磁場構造

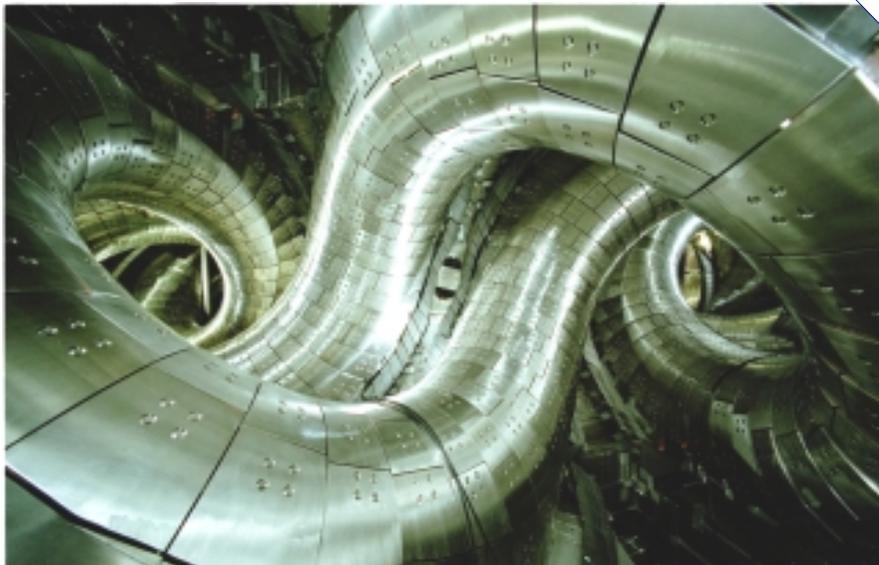
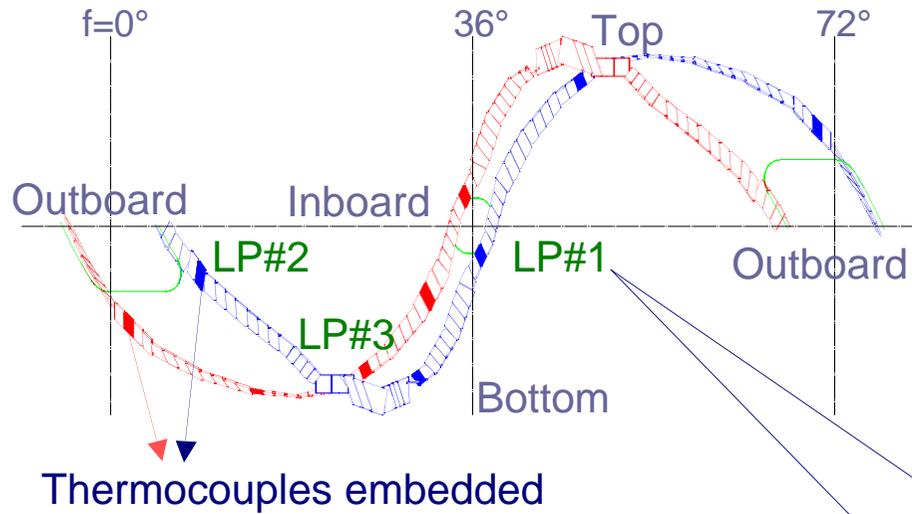


周辺プラズマ構造

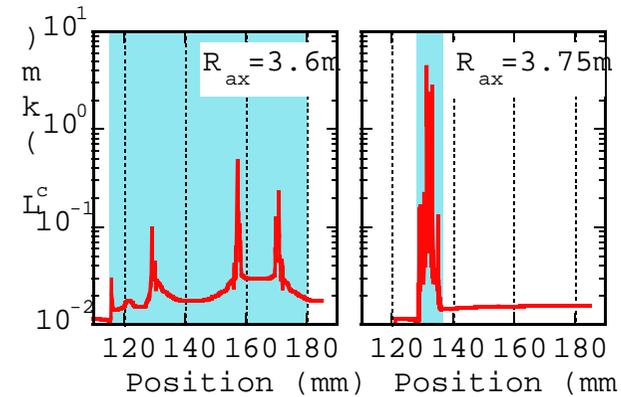
1. 磁気島を含んだ統計的磁気面領域
2. 周辺表面層領域
3. ダイバータ領域



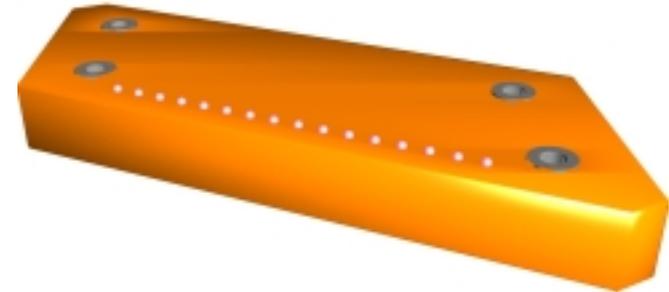
LHDの計測系



Inside of the LHD vacuum vessel (view from outboard port)



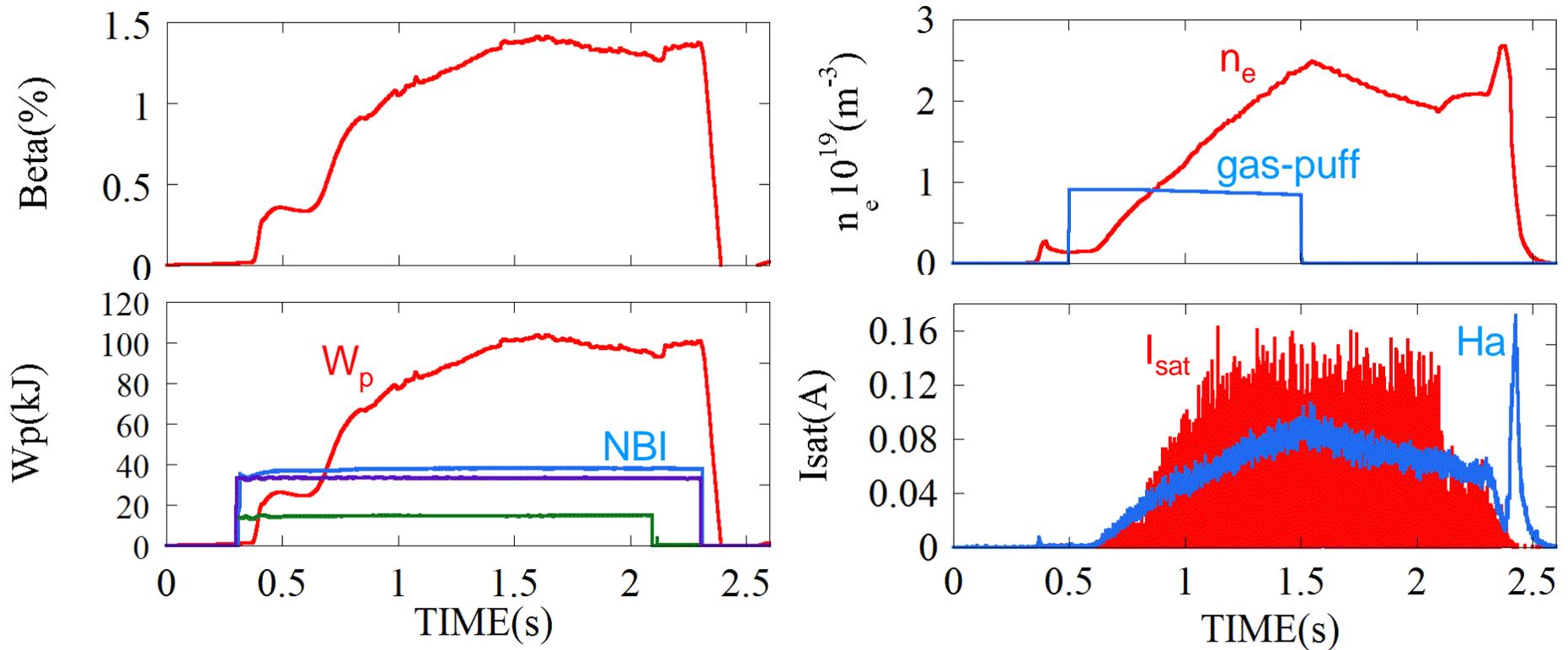
ダイバータ板へ接続する磁力線の結合長



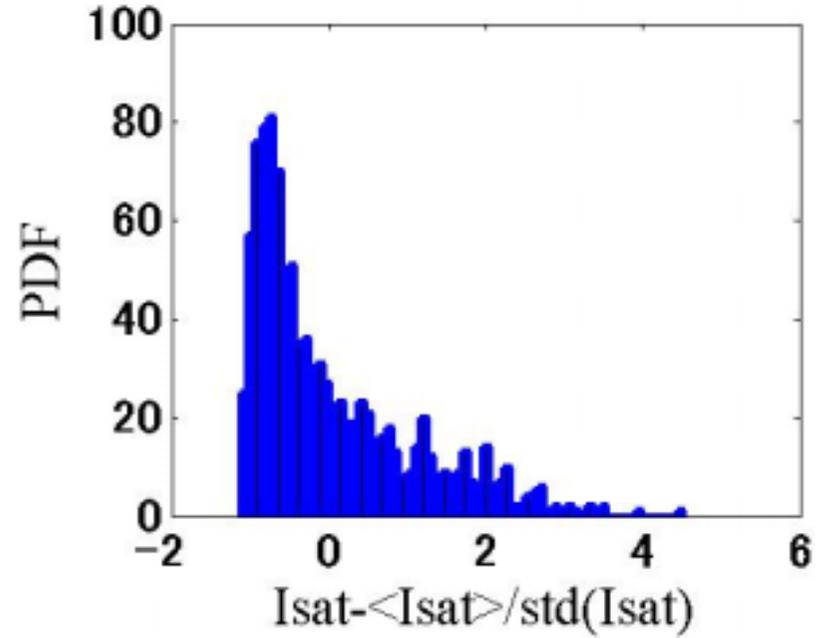
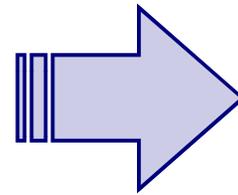
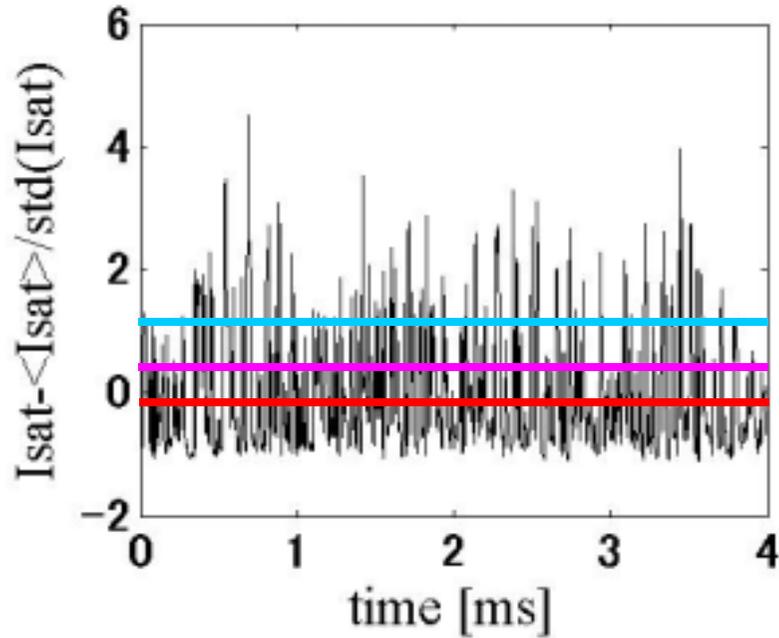
ダイバータ板に埋め込まれた16CHの
 ラングミュアプローブアレイ
 グラファイト製のドーム型電極
 (半径 1m m)
 プローブ間の距離 : $d=6$ m m
 サンプル周波数 : $f=250$ kHz

放電波形 (1)

SN : 40103 , $B = 0.750\text{T}$, $R_{ax} = 3.750\text{ m}$, Gas : He



統計的解析

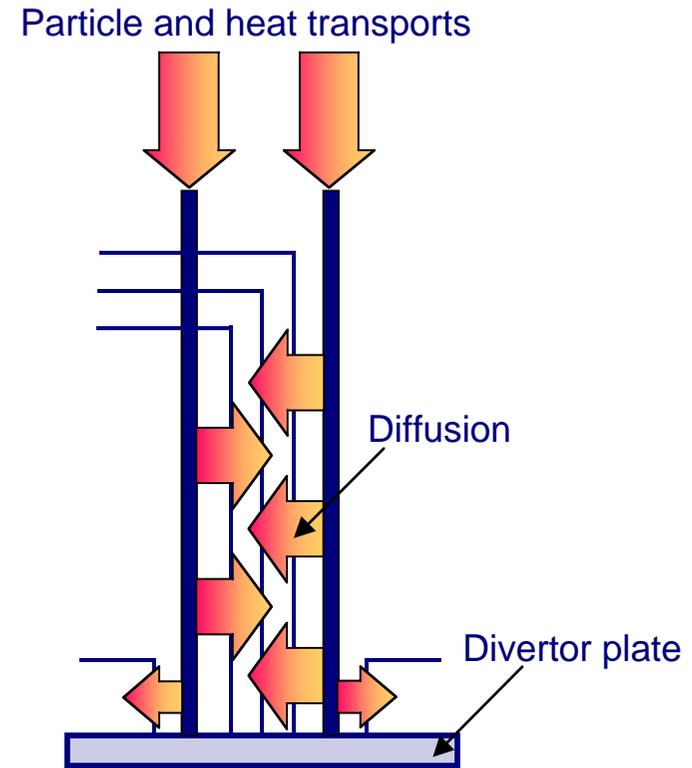
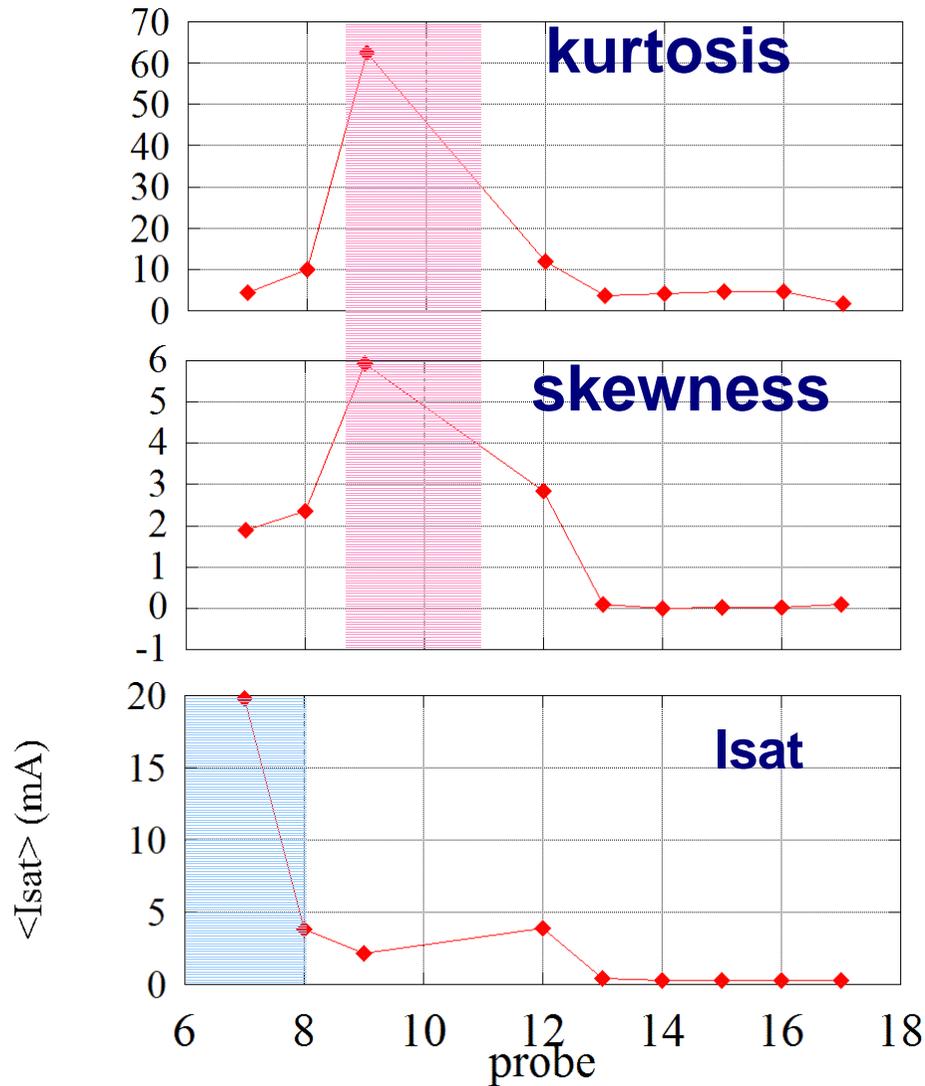


元の波形から確率分布関数 (Probability Distribution Function) を作成

Skewness $\frac{\langle \tilde{x}^3 \rangle}{\langle \tilde{x}^2 \rangle^{3/2}}$: PDFの左右対称性 \longrightarrow ガウス分布では 0

Flatness $\frac{\langle \tilde{x}^4 \rangle}{\langle \tilde{x}^2 \rangle^2}$: PDFのテール部分の重み \longrightarrow ガウス分布では 3

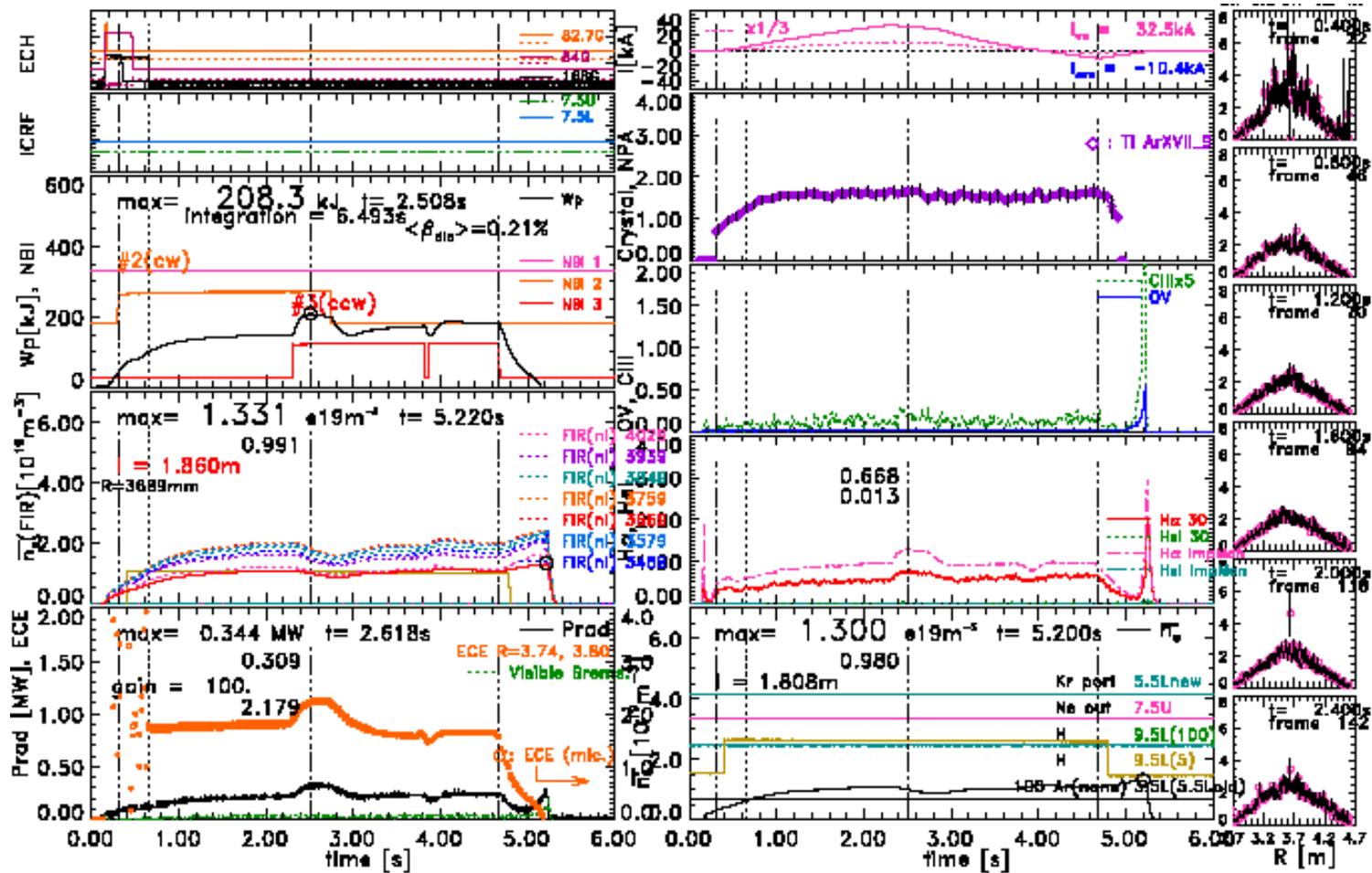
解析結果 (1) -Rax=3.750m-



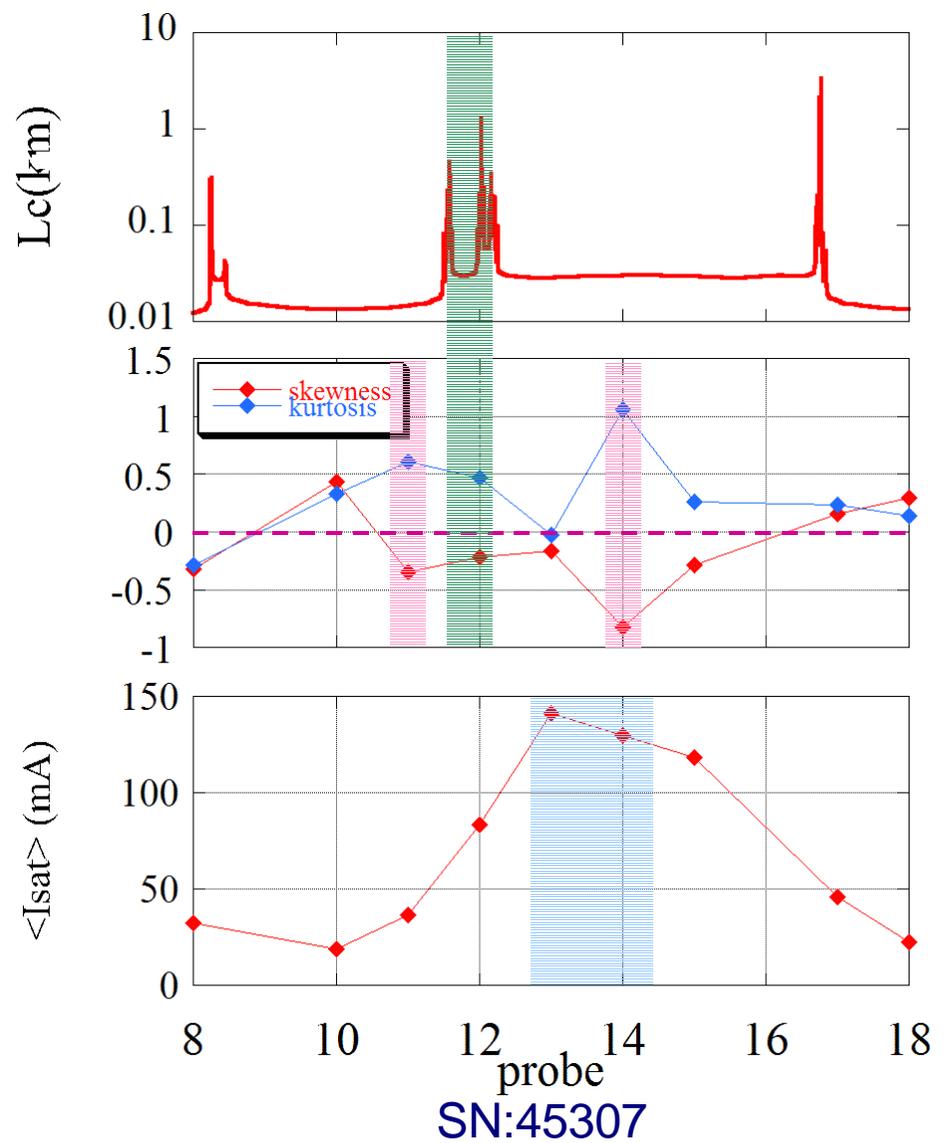
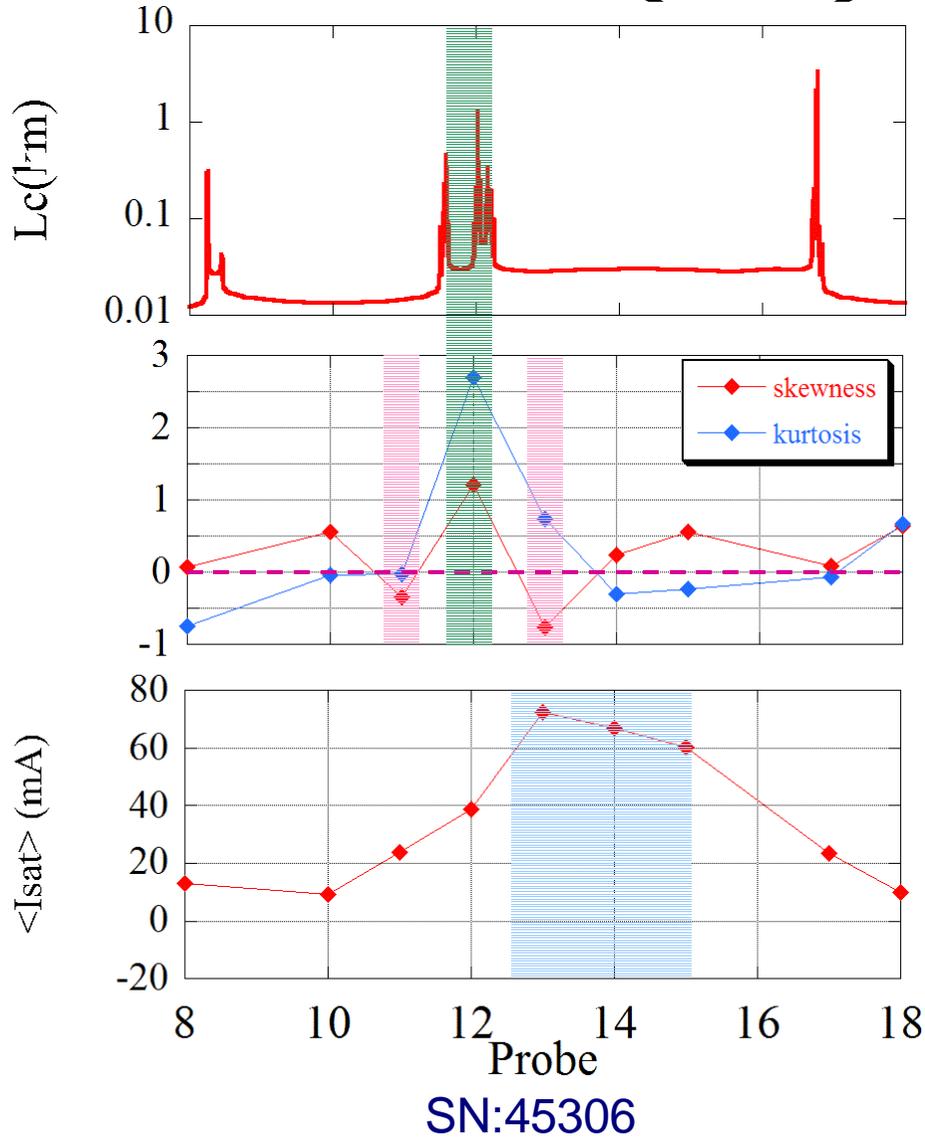
PDF が正に大きく偏るのはIsaが
最大値をとる位置よりも外側

放電波形 (2)

SN : 45305 , B = 2.750T , Rax = 3.600 m , Gas : H



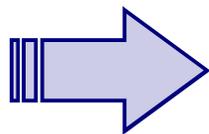
解析結果 (2) -Rax=3.600m-



マルチフラクタル性

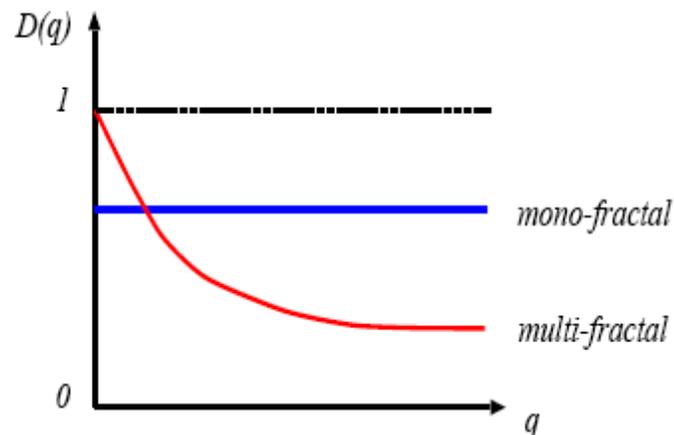
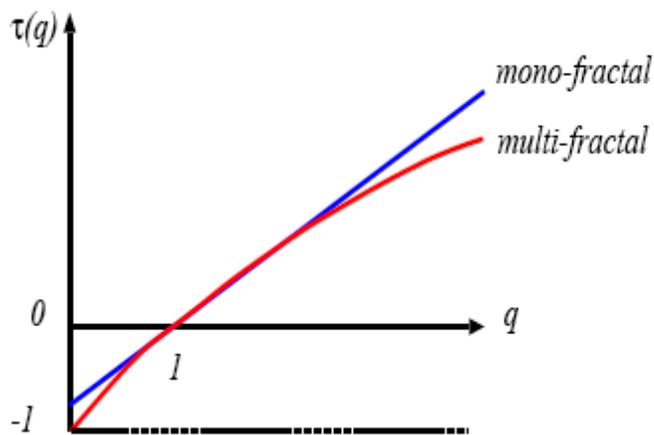
$$m(1) = \int_t^{t+1} X(t) dt$$

$$\langle |m(1)|^q \rangle \sim I^{r(q)}$$

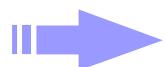


$$\text{一般化次元} : D(q) = \tau(q) / (q-1)$$

マルチフラクタルでは D は q に関して非線形な関数となる。

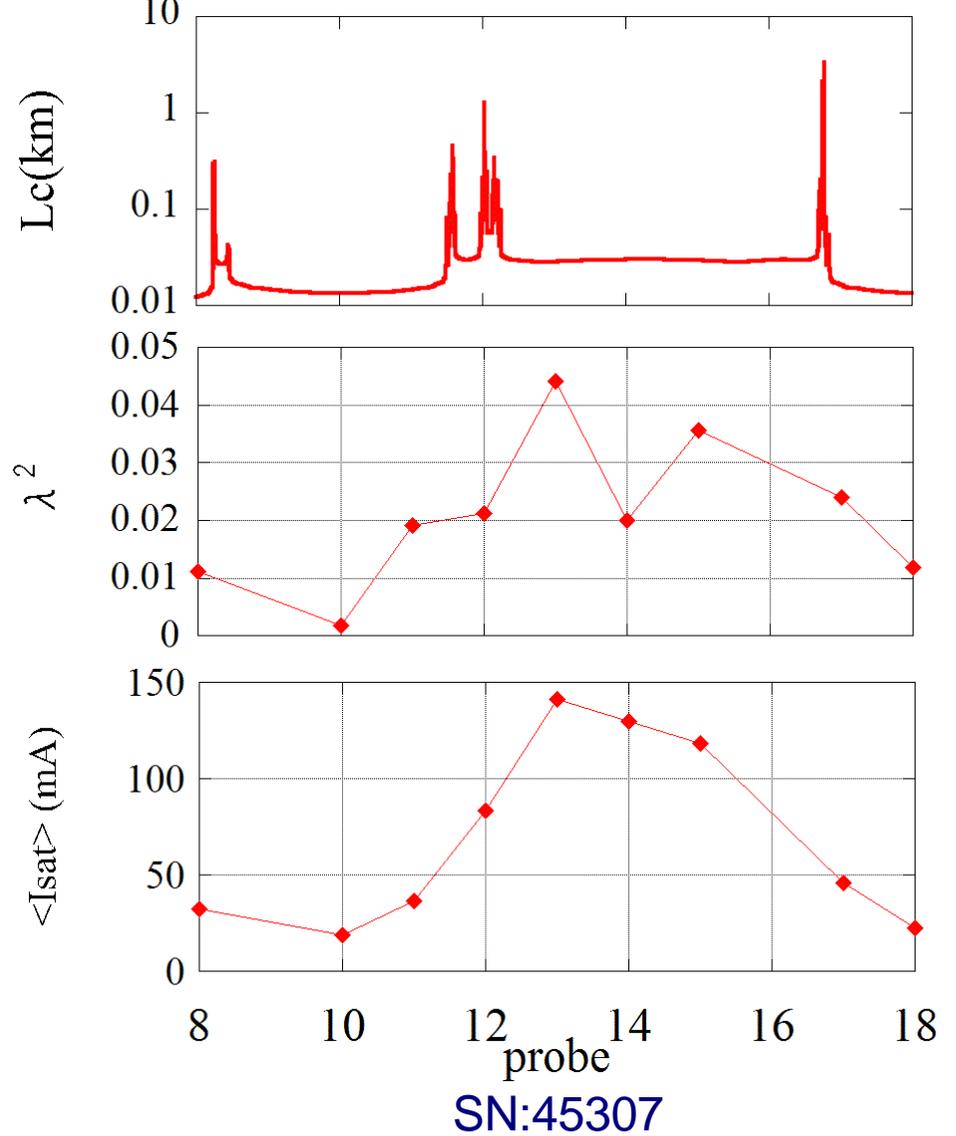
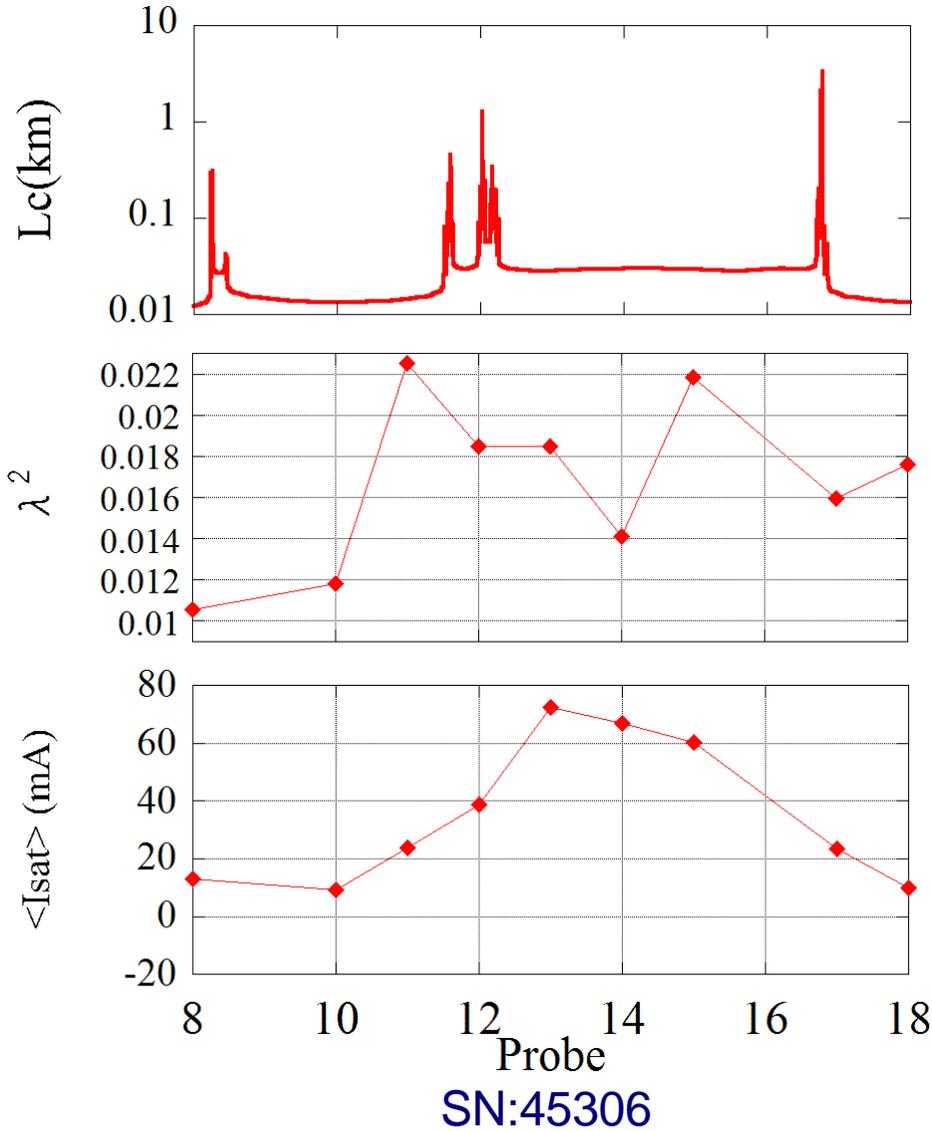


マルチフラクタルの場合、単一のスケーリング指数 D では表せない。

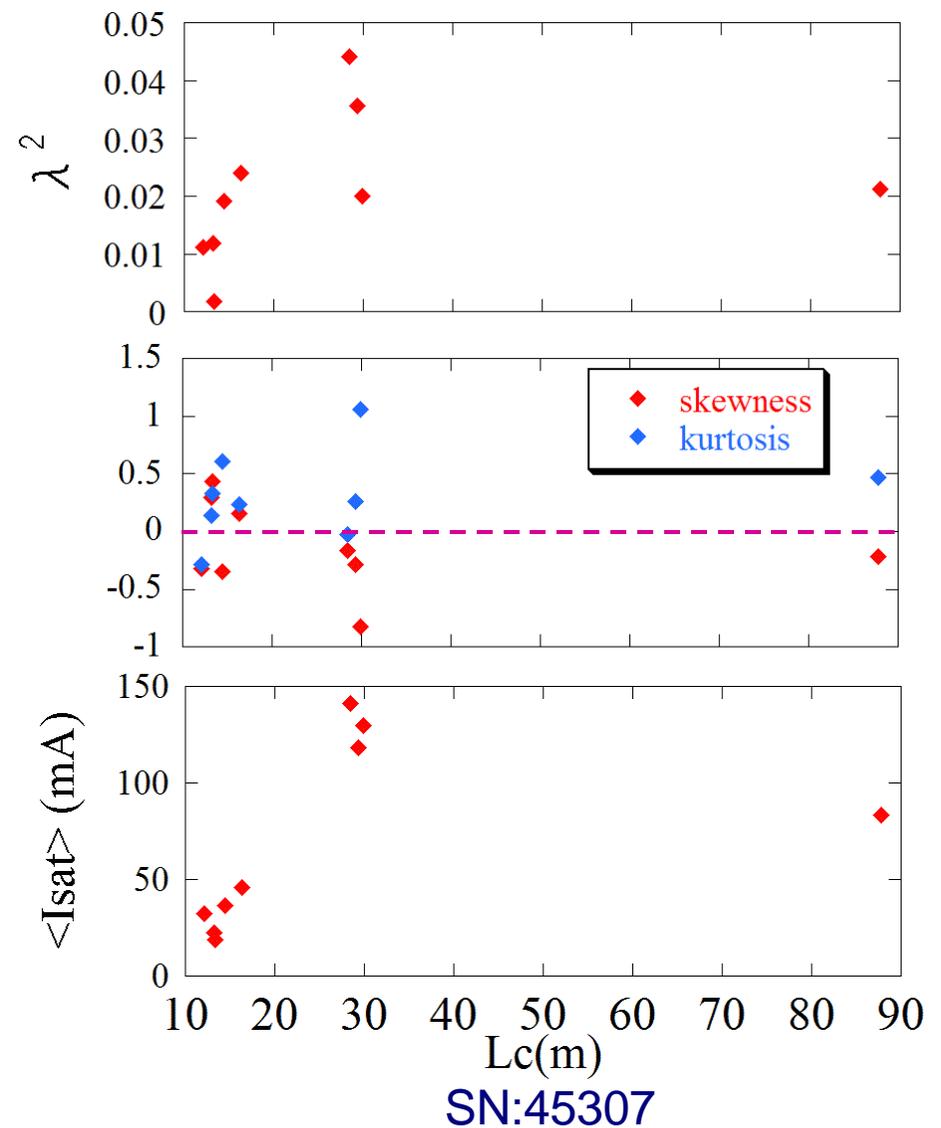
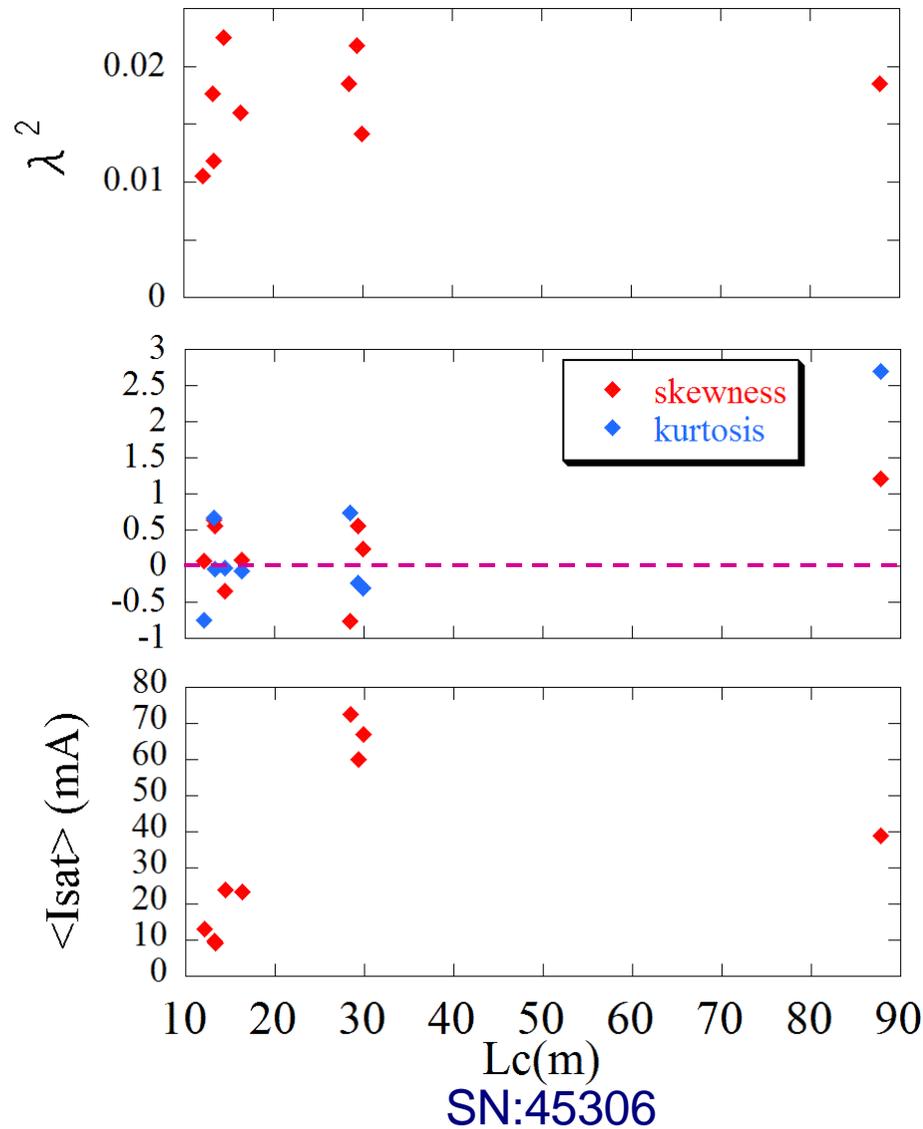


$\tau(q) = qH - \lambda^2 q^2$ によりマルチフラクタル性を評価

解析結果 (3) -Rax=3.600m-



磁力線の結合長による依存性





まとめと今後の課題 -LHD-

ヘリカル型装置であるLHDの周辺部の揺動特性を評価した。

2種類の異なる磁場配位の放電について解析することにより、周辺部へのプラズマの輸送と磁力線の結合長に関するらしいことが分かった。

次元解析より、LHDの揺動はマルチフラクタル性を有し、その特性は位置によって変化する。

今後は磁場計算の結果と併せて磁力線の結合長とプラズマの輸送との関係を明らかにする必要がある。また、次元解析をさらに進めることで、揺動特性をより詳細に調べることが必要である。

磁力線の結合長依存に関する更なる解析

JT-60Uにおける揺動特性

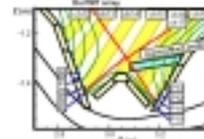
計測系 (1)

静電プローブ (サンプルング周波数200kHz)

- ・ 水平面掃引プローブ、X点掃引プローブ
- ・ ダイバータプローブアレイ

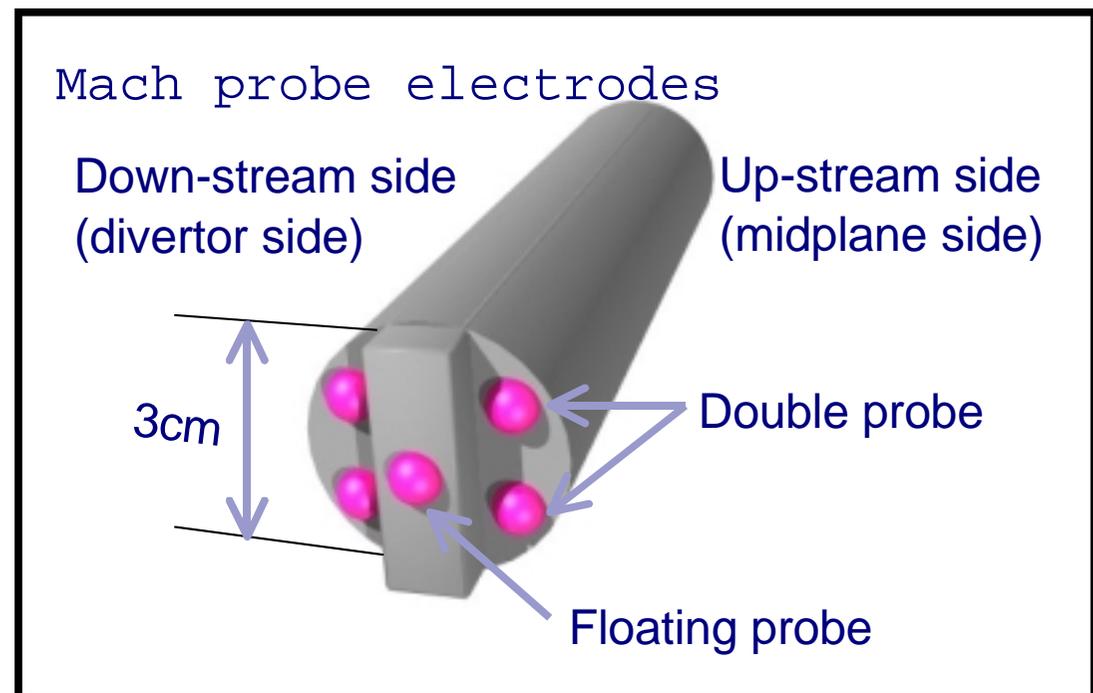
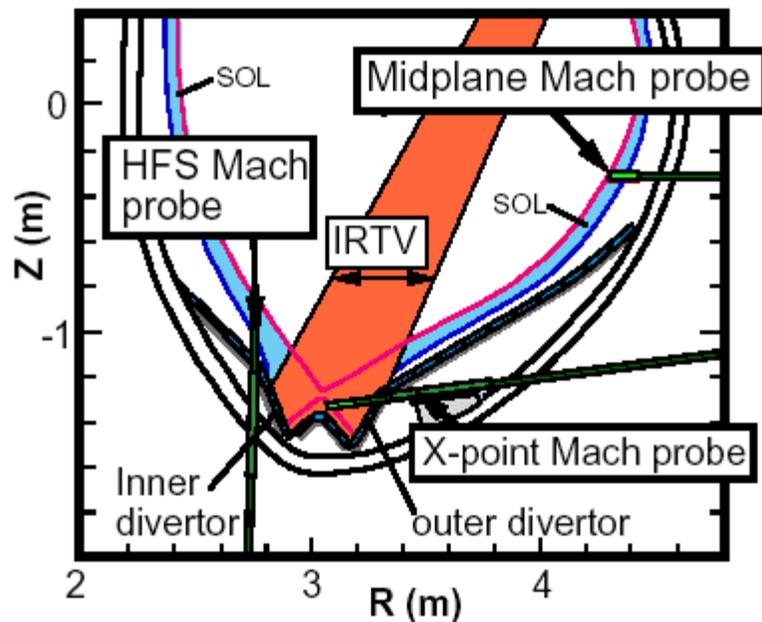
D 発光 (サンプルング周波数100kHz)

- ・ CH14 ダイバータ内側
- ・ CH18 ダイバータ外側



計測系 (2)

水平面およびX点に設置された掃引型マッハプローブにより
磁力線に沿った方向の流れが評価できる。



放電波形

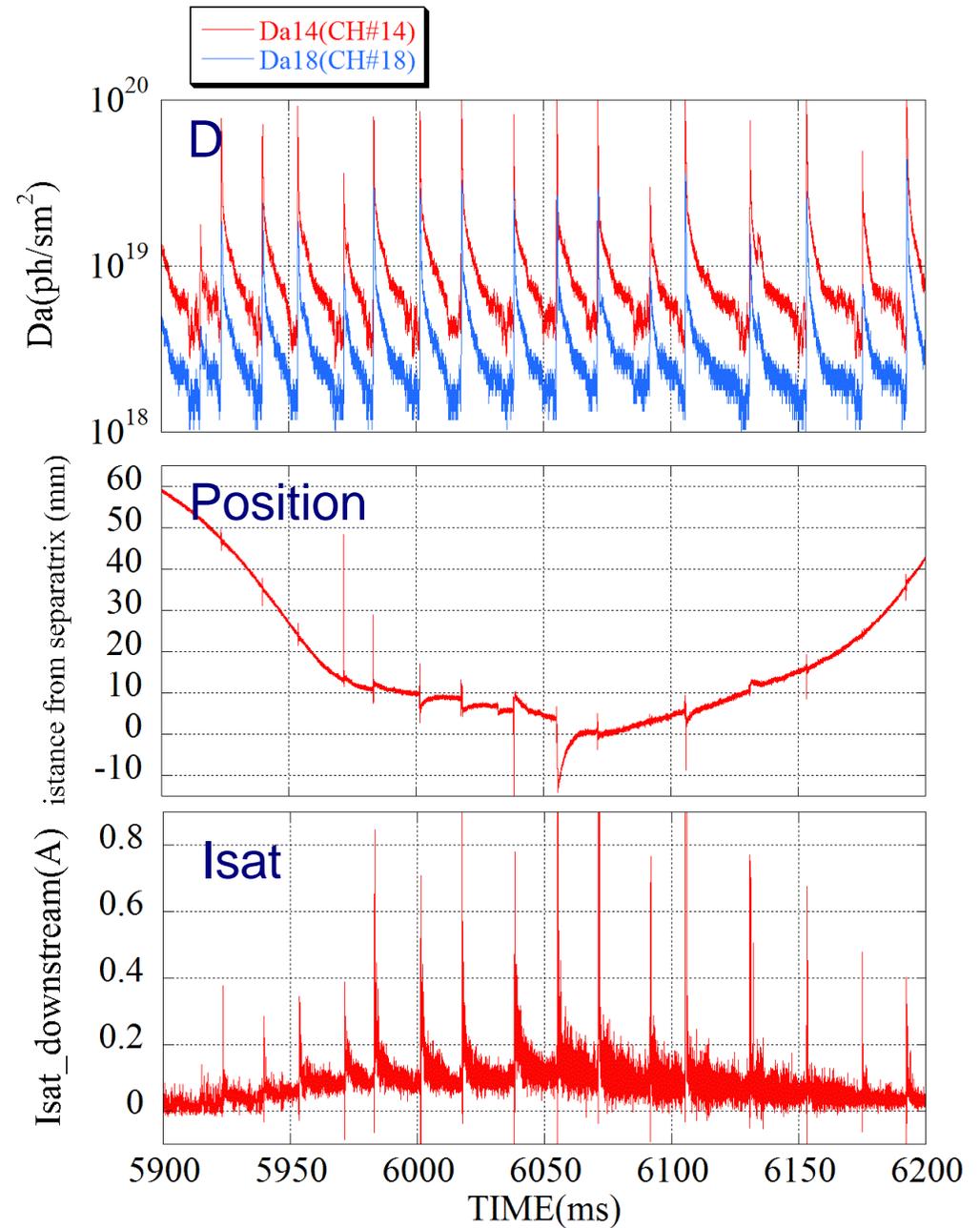
SN : 41784

ELMy H-mode Discharge

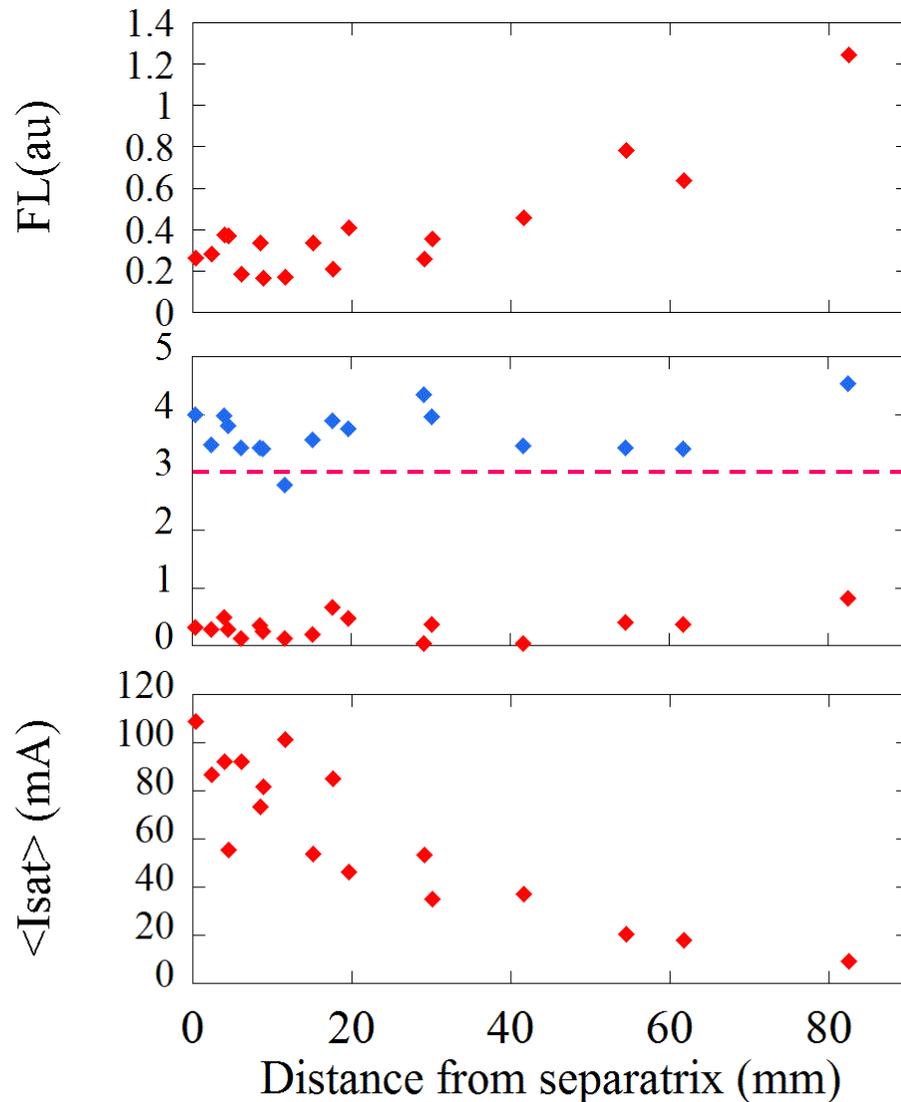
Da at ch14 and ch18

Distance from separatrix

Mid-plane probe (down-stream)



解析結果 -Mid-plane, btw. ELMs-

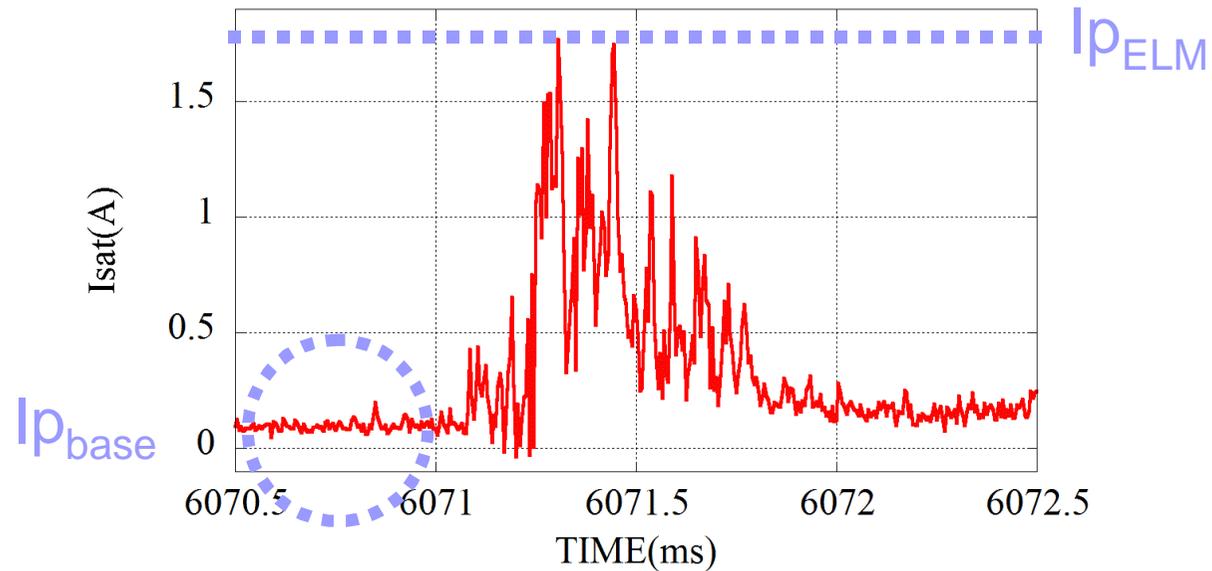


標準偏差を平均値で規格化した揺動レベルは周辺部で増加

ELM間の揺動特性は径方向の位置により大きく変化することはない。

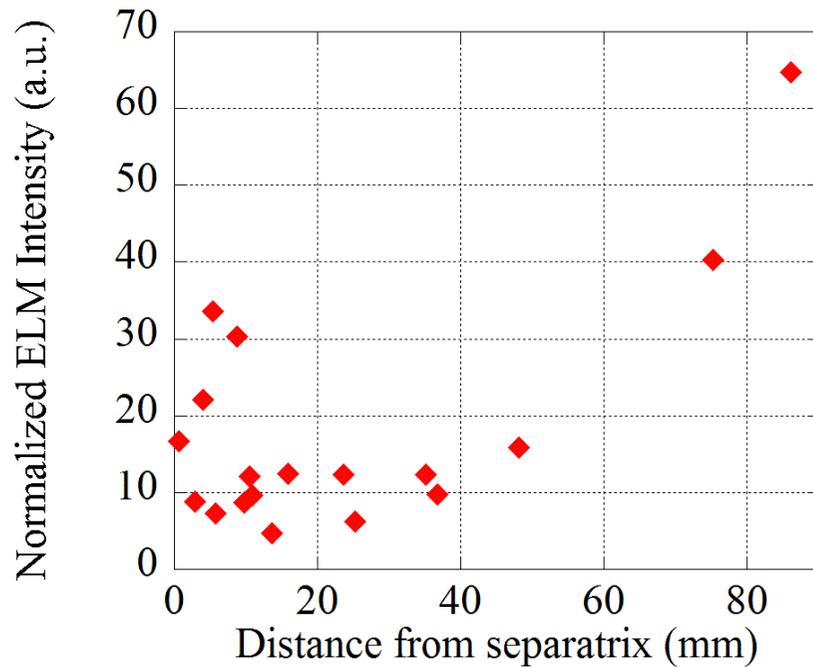
セパトリクスに近づくにつれてイオン飽和電流の値は上昇

ELM 強度の評価方法

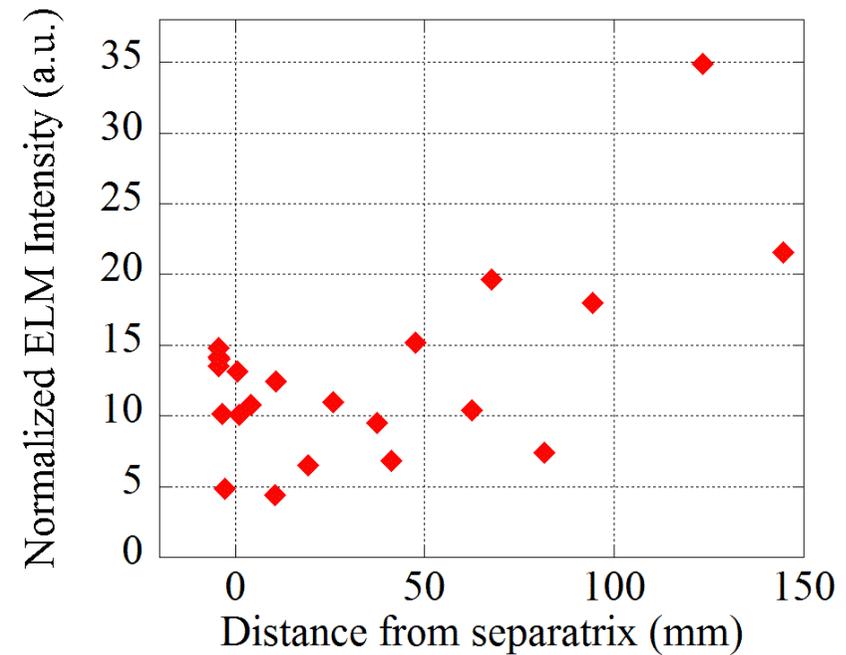


$$\text{Normalized ELM Intensity} = \frac{I_{p_{ELM}}}{I_{p_{base}}}$$

ELM 強度の径方向分布



Mid-plane



X-point

規格化されたELM 強度はセパトリクスから離れるにつれて増加

まとめと今後の課題 -JT-60U-

JT-60Uの典型的なELMy H-mode放電における揺動特性を評価した。

径方向の分布に関して、イオン飽和電流はセパトリクスに近づくと共に値が増加するのに対して、揺動レベルおよびELM強度は周辺部ほど増加する。また揺動特性には大きな変化は見られない。

水平面とX点との比較より、セパトリクスから $\sim 60\text{mm}$ の範囲では磁力線を横切る方向の輸送が特徴的であり、さらに周辺部では磁力線に沿った方向の輸送が主である。

今後は更に高速サンプリング（ 1MHz ）による計測および計測系の改善により、ELM間の揺動特性を詳細に調べる必要がある。