

第14回若手科学者によるプラズマ研究会

日時: 平成23年3月7日(月) - 9日(水)

場所: 日本原子力研究開発機構

那珂核融合研究所

JT-60制御棟2F大会議室

熱・粒子制御に関連した 周辺プラズマ物理現象

名古屋大学大学院工学研究科

エネルギー理工学専攻

大野 哲靖

高性能炉心プラズマの定常維持・制御に対する 周辺プラズマの役割

必要条件

- 炉壁の耐久性
- 燃料粒子, 不純物粒子輸送制御

炉心プラズマの定常維持・制御の基盤を与える

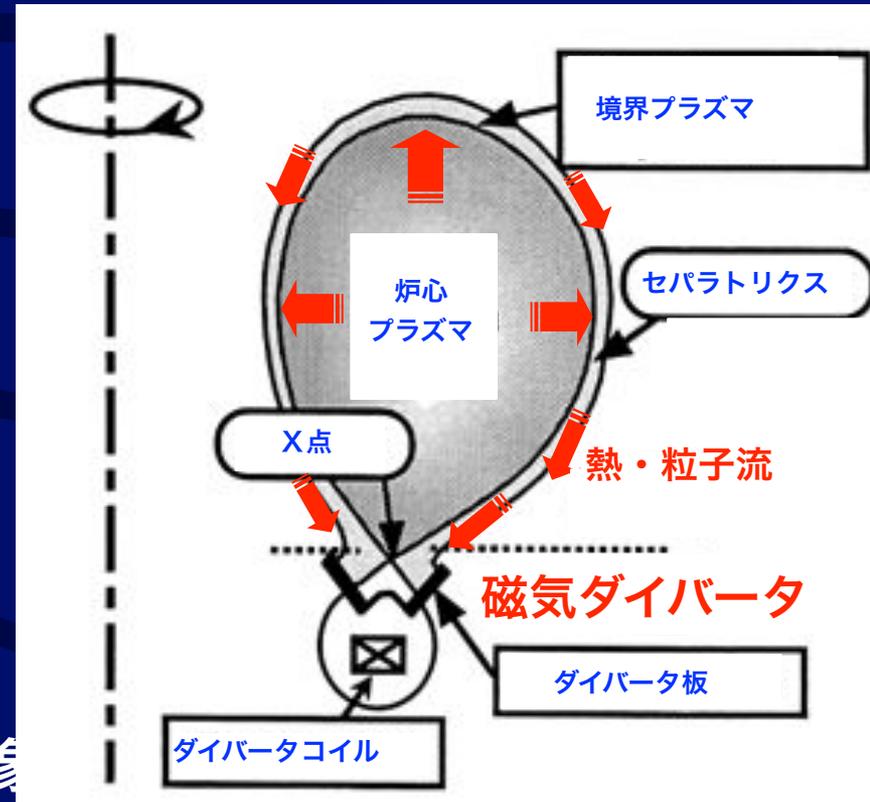
課題

プラズマ対向壁への粒子・熱負荷制御
- **非接触プラズマ**

境界プラズマ領域でのプラズマ輸送現象の理解 - **Plasma Blob輸送**

プラズマ対向材料の選定と開発

物理, 工学両面からのアプローチが必要

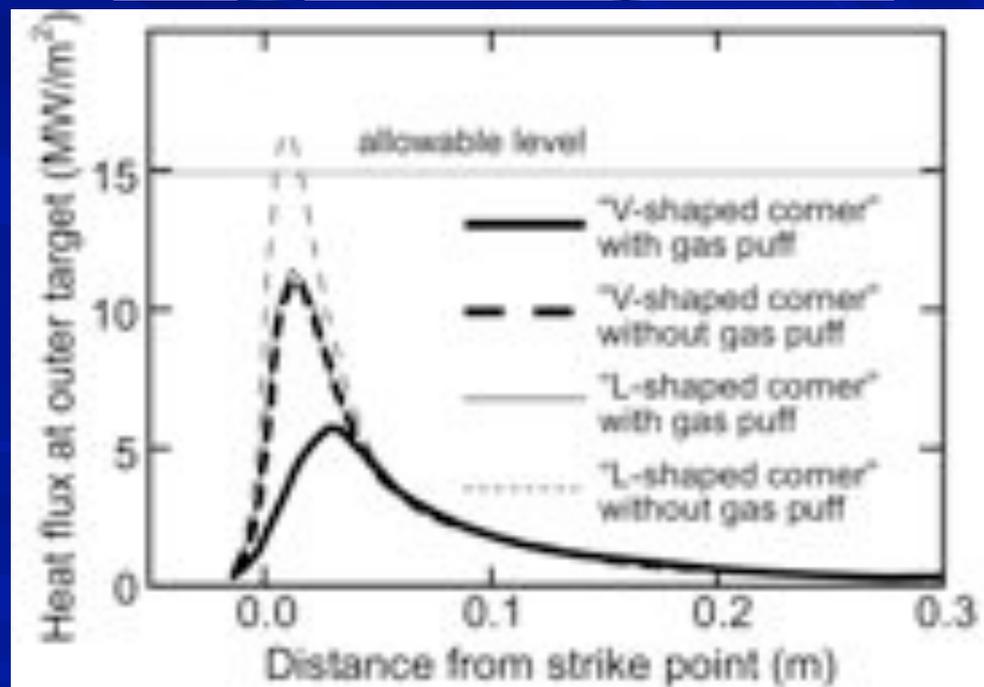
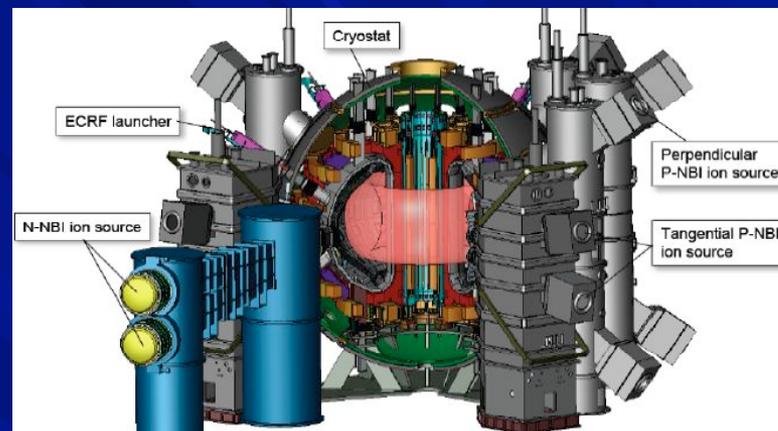


JT-60SAでのダイバータ板への熱負荷評価

- 具体的な設計を行うと問題が顕在化
 - 過酷な熱・粒子負荷

Table 1 JT-60SA Parameters

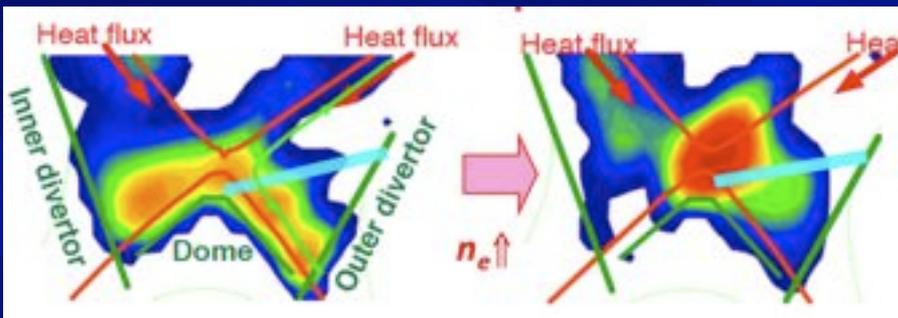
Parameters	Low A	ITER like
Plasma Current I_p	5.5 MA	3.5 MA
Toroidal Field B_T	2.68 T	2.6 T
Major Radius R_p	3.06 m	3.15 m
Minor Radius a_p	1.15 m	1.02 m
Aspect Ratio A	2.66	3.09
Elongation κ_{95}	1.76	1.69
Triangularity δ_{95}	0.45	0.36
Safety Factor q_{95}	3.11	3.06
Flat Top	<u>100 sec (8 hours in future option)</u>	
H&CD Power	<u>41 MW x 100 sec</u>	
P-NB	24 MW (85 keV)	
N-NB	10 MW (500 keV)	
ECRF	7 MW (110,140 GHz)	
Divertor Heat Flux	15 MW/m ²	
Annual Neutron	4×10^{23}	



部分非接触プラズマの
定常維持を前提とした
設計

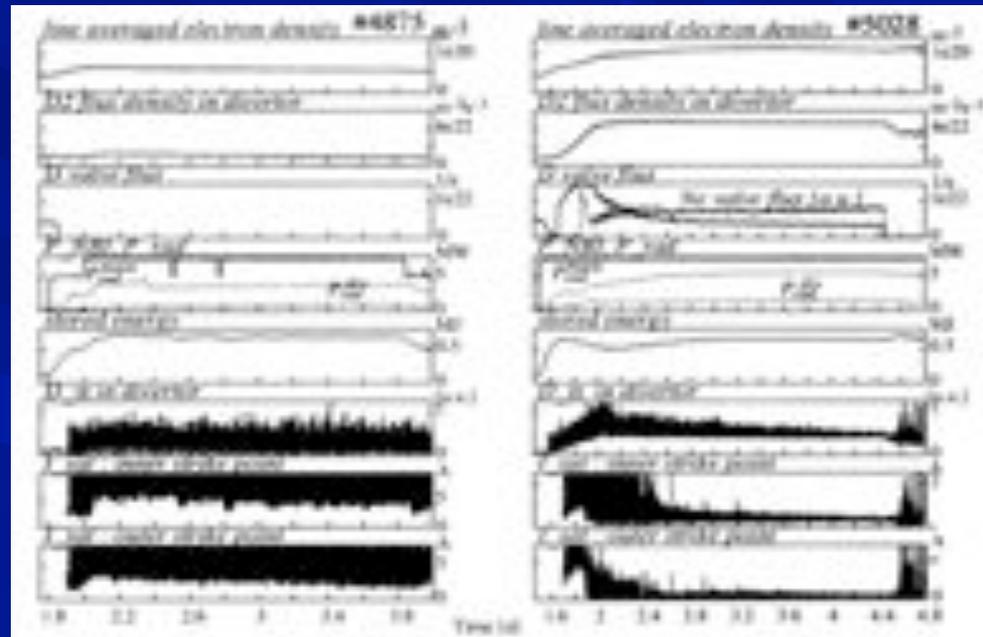
非接触ダイバータの定常維持・制御と高性能炉心 プラズマとの両立は喫緊の重要課題

非接触プラズマは不安定→容易にX点MARFEに移行



N. Asakura et al. PSI18

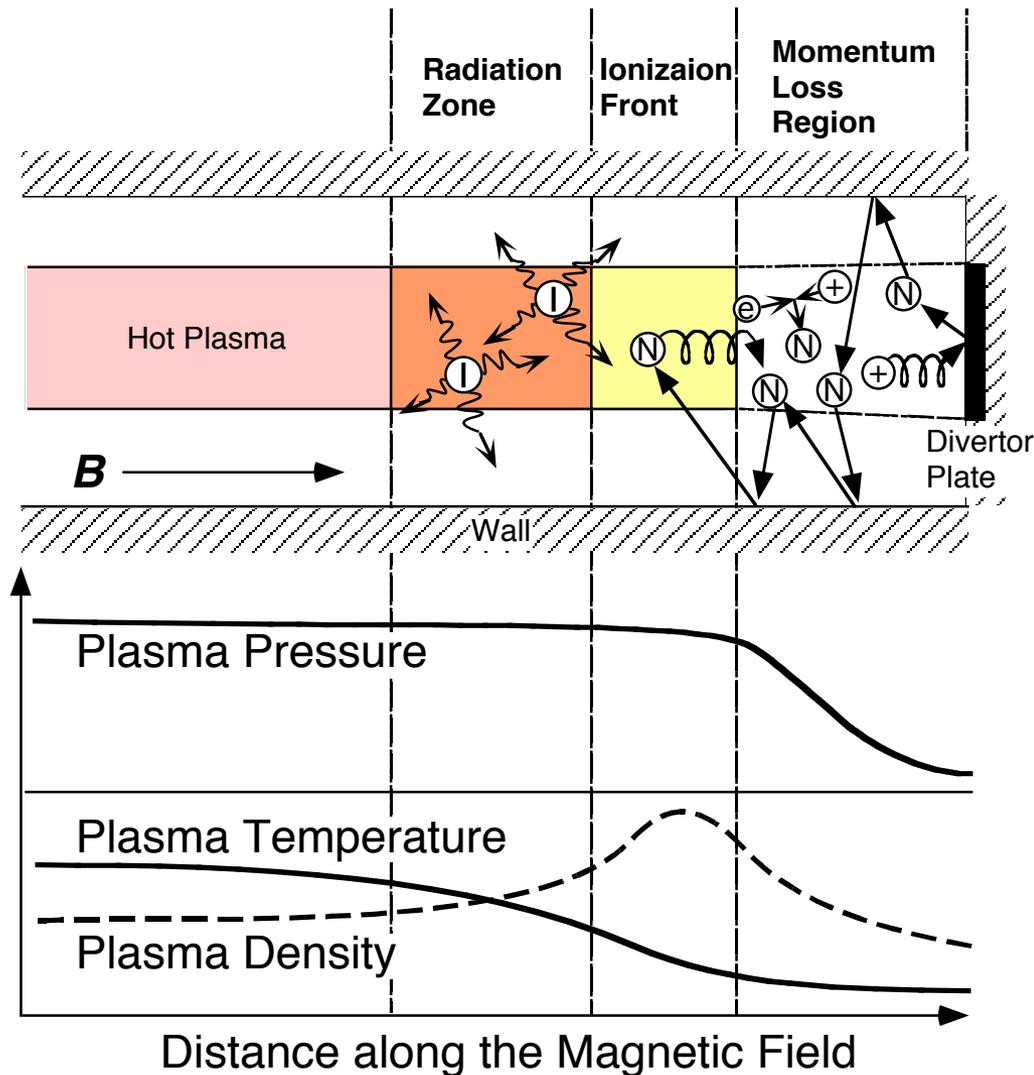
大型核融合装置での長時間放電中において、ダイバータ配位およびダイバータ排気量制御による非接触プラズマの定常維持・制御の実証が必要
(高性能炉心プラズマとの両立性)



ASDEX-Uでの高性能炉心プラズマとの非接触プラズマの両立（しかしわずか数秒）

PRL 74 (1995)4217

- 非接触プラズマ現象の概要 -



ダイバータ領域の中性ガス圧の増加

→放射冷却による
電子温度の低下

→低温高密度プラズマ
の生成

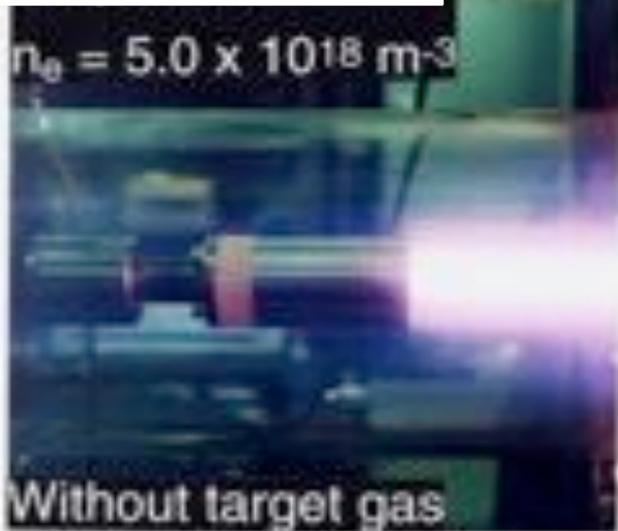
→体積再結合の発生

→プラズマの消失

→ダイバータ板への
熱負荷の減少

非接触プラズマの生成と熱・粒子制御

接触プラズマ

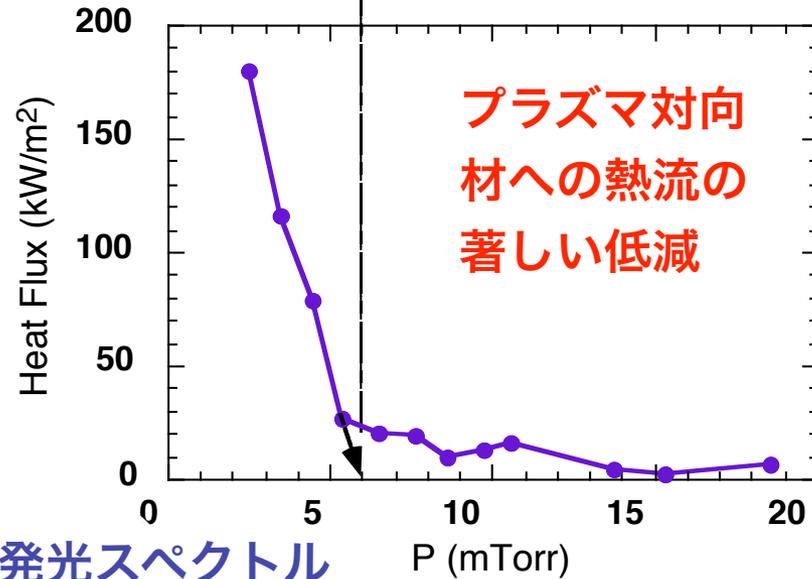


非接触プラズマ

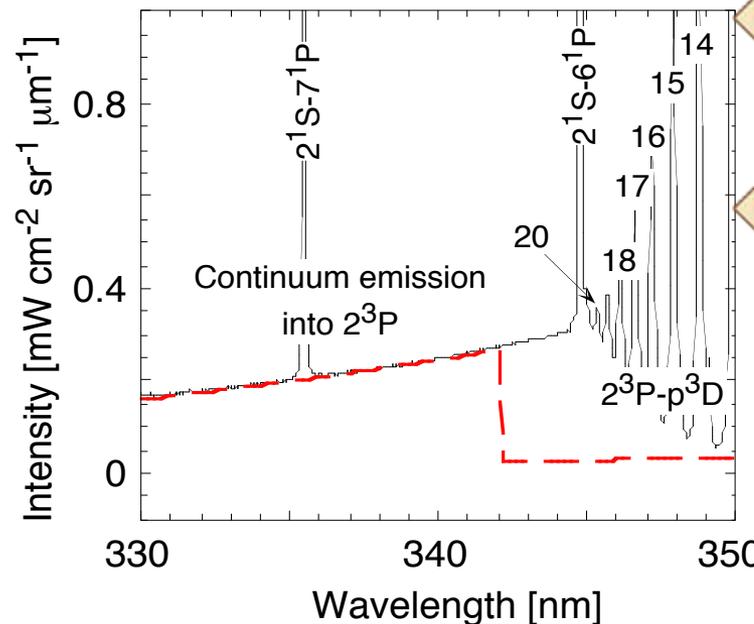


ガスバッファ層の形成

接触プラズマ ← → 非接触プラズマ



近紫外発光スペクトル



3体再結合に伴う高励起準位からの発光線

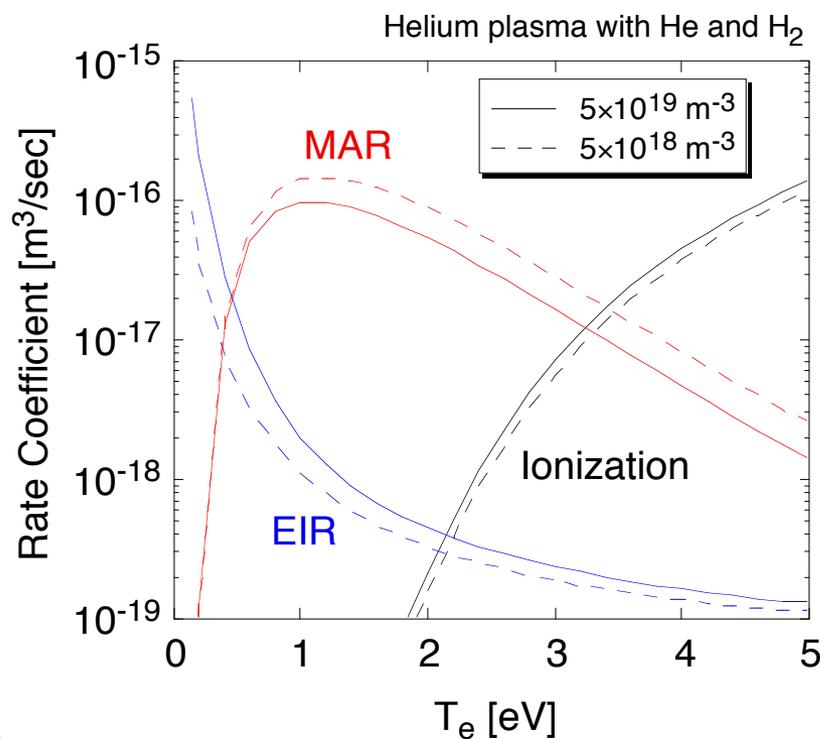
放射再結合に伴う連続スペクトル

電子-イオン体積再結合によるプラズマ消失の実証

プラズマ体積再結合

放射及び三体再結合(EIR)と分子活性化再結合(MAR)

NAGDIS-II



放射及び三体再結合

- ・低温・高密度で支配的
- ・特徴的な発光スペクトルを伴う
- ・多くのトカマク装置で観測



分子活性化再結合

- ・振動励起状態の水素分子に関連
- ・数eV・低密度で支配的
- ・特徴的な発光スペクトルがない
- ・トカマクにおいては詳細な実験研究がなされていない

ダイバータプラズマ模擬研究

周辺プラズマは開いた磁力線構造を有する

→直線型装置を用いたダイバータ模擬研究

直線型ダイバータ模擬試験装置

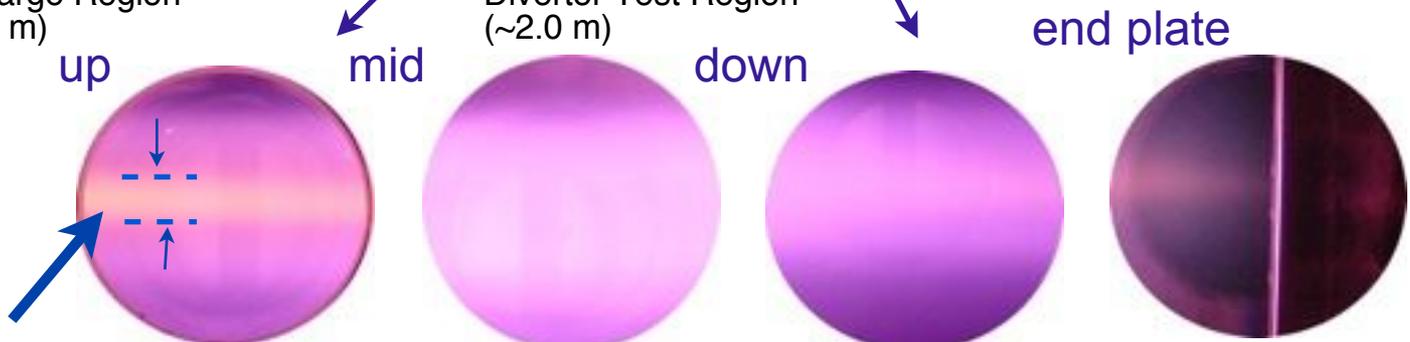
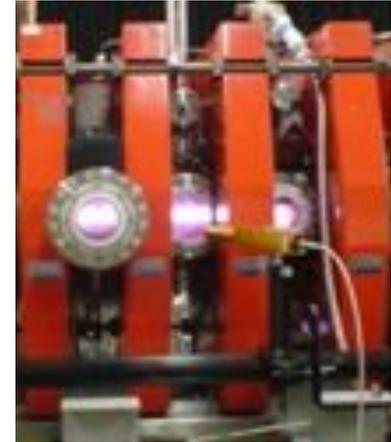
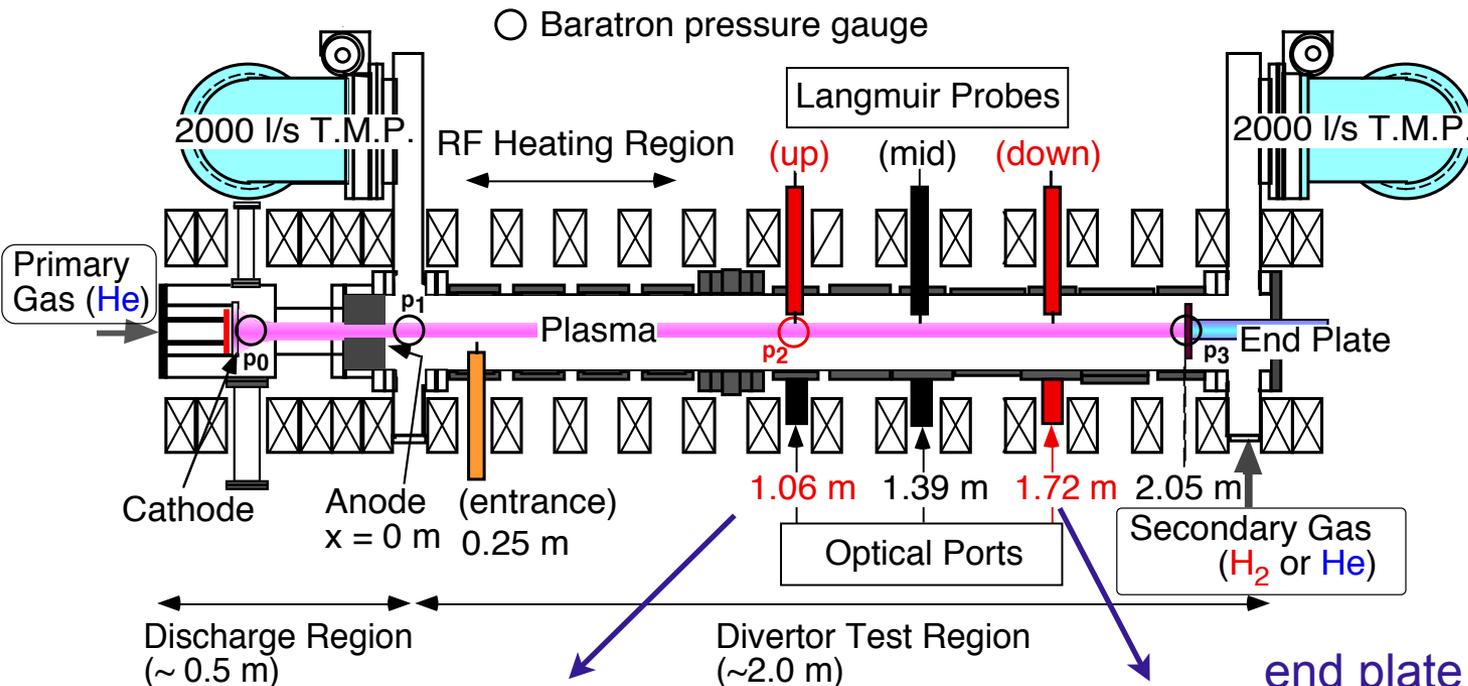
- 定常で高密度プラズマの生成が可能
- プラズマパラメータの制御性が高い
- 計測器の配置が容易
- 単純な幾何学的配位

QED, PISCES-A (B), PDS, TPD-I (II) , PSI-2, LENTA, ULS,
MAP-II, TPDSHEET-IV

NAGDIS-I → NAGDIS-II → NAGDIS-T

ダイバータ模擬試験装置で観測された非接触プラズマ

Ne 10^{20} m⁻³
Te = 5~10 eV



10mtorr

Original plasma column
(diameter ~ 20 mm)

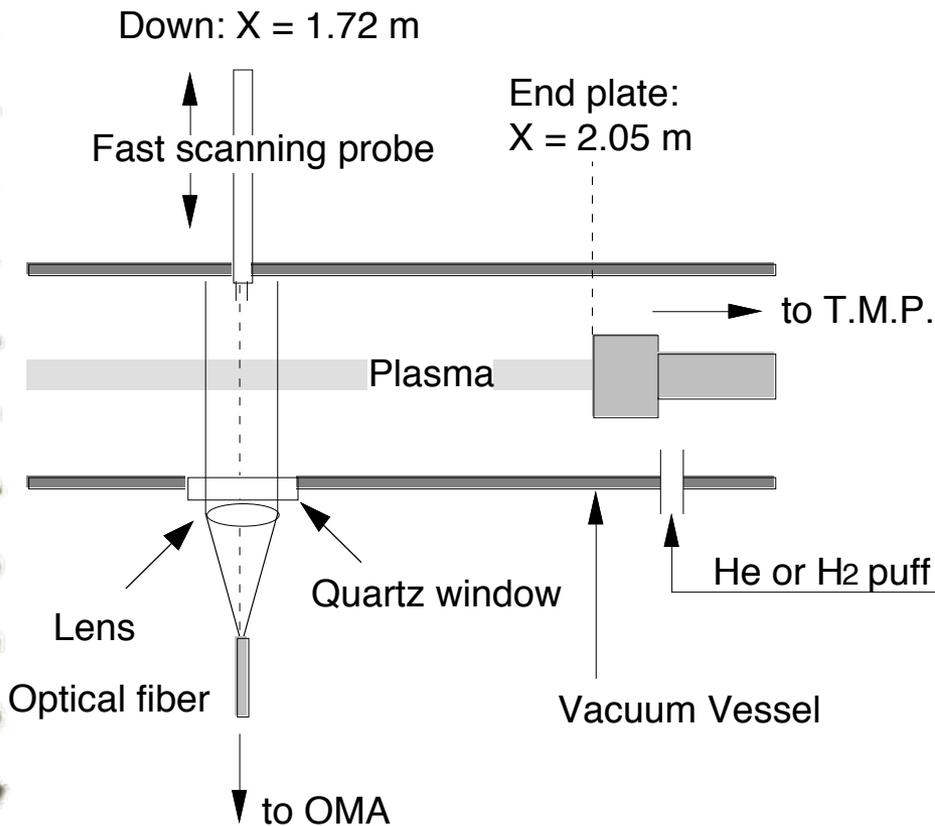
Recombining
Region

Plasma is detached from
the end plate

Plasma column becomes broader due to plasma detachment!!

分光計測系

NAGDIS-II



Optical Multichannel Analyzer

- Czerny-Turner型分光器

焦点距離: 0.75 m

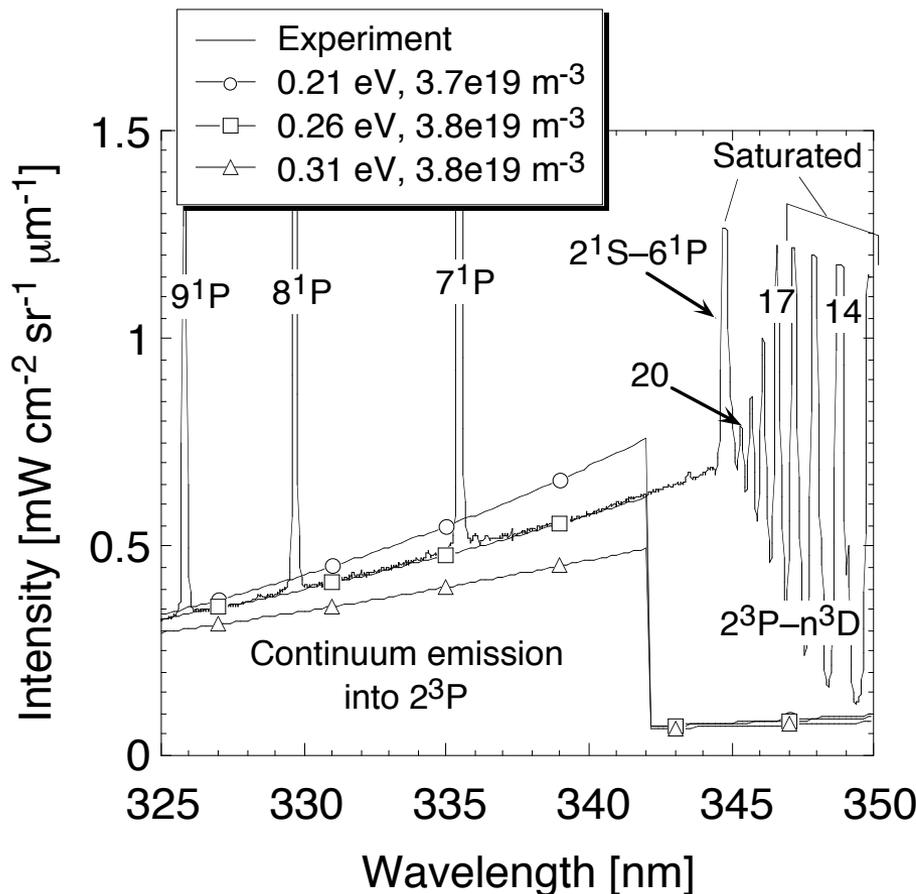
- 二次元CCDカメラ

1100 x 330 pixel

#分光計測系は絶対校正されている

ヘリウム再結合プラズマからの 発光スペクトルと連続スペクトル解析

NAGDIS-II

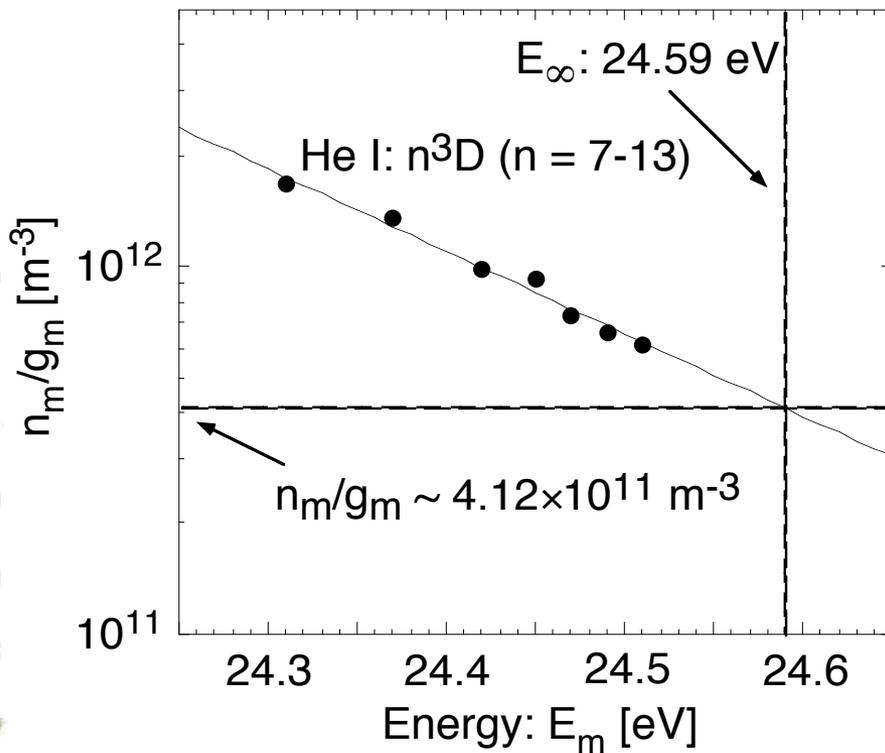


$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda, T_e, n_e) = & \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{32(\alpha\alpha_0)^3 z E_H}{3^{3/2} \pi^{1/2}} \left(\frac{z^2 E_H}{kT_e} \right)^{3/2} \\ & \times \left[\sum_{n \leq 3} \frac{g_{nl}^z(\lambda)}{n^3} \exp\left(\frac{E_\infty^{z-1} - E_{nl}^{z-1}}{kT_e} \right) \right. \\ & + \sum_{n \geq 4} \frac{g_n^z(\lambda)}{n^3} \exp\left(\frac{z^2 E_H}{n^2 kT_e} \right) \\ & \left. + \frac{g_f^z(\lambda, T_e)}{2} \frac{kT_e}{z^2 E_H} \exp\left(\frac{\Delta E_L}{kT_e} \right) \right] \\ & \times n_e n_i^z \exp\left(\frac{-\Delta E_z - h\nu}{kT_e} \right). \end{aligned}$$

線スペクトル解析

— ボルツマンプロット法 —

NAGDIS-II



サハーボルツマン方程式

$$\frac{n_e n_i}{n_m} = \frac{2g_i}{g_m a_0^3} \left(\frac{kT}{4\pi E_H} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{mi}}{kT}\right)$$



部分的局所熱平衡 (PLTE)

$$T_e \sim 0.19 \text{ eV}, n_e \sim 2.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

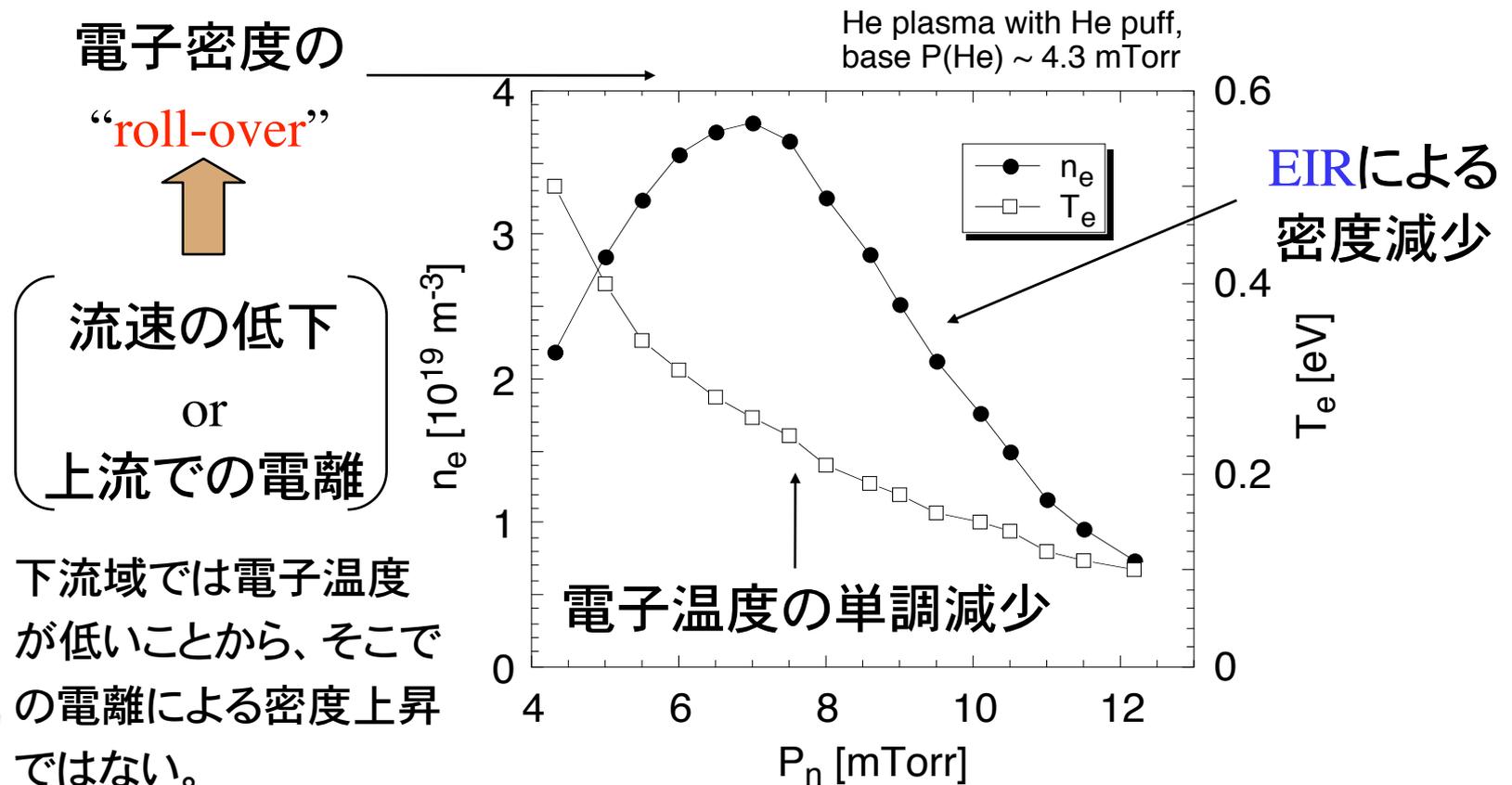


低～中ガス圧においては常に
連続スペクトル法から求めた
電子温度より低い値を示す。

- ・高エネルギー電子成分の影響
- ・空間分布の影響

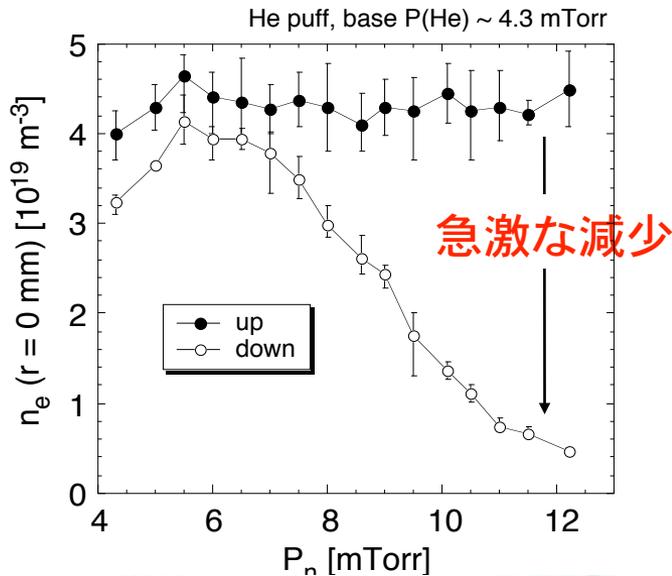
下流域における電子密度・温度の 中性ガス圧依存性 (連続スペクトル解析)

NAGDIS-II



上流域及び下流域における電子密度の 中性ガス圧依存性

NAGDIS-II



$P_n < 6$ mTorr --> 上流電子密度の上昇
 ⇒ 下流電子密度の上昇
 流速の影響?

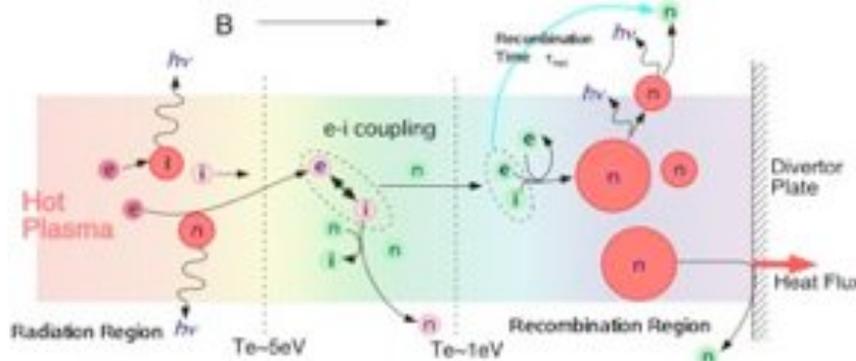
$P_n \geq 6$ mTorr
 --> 上流電子密度はほぼ一定

⇒ 電子-イオン温度緩和過程による効率的な電子温度の低下 ($T_e < 1$ eV)

$$\tau_{ei}^T \propto n_i^{-1} T_e^{3/2}$$

⇒ 放射及び三体再結合の発生

⇒ 下流電子密度の低下



分子活性化再結合過程

分子活性化再結合 MAR : Molecular Activated Recombination



(荷電交換再結合)



(解離性再結合)

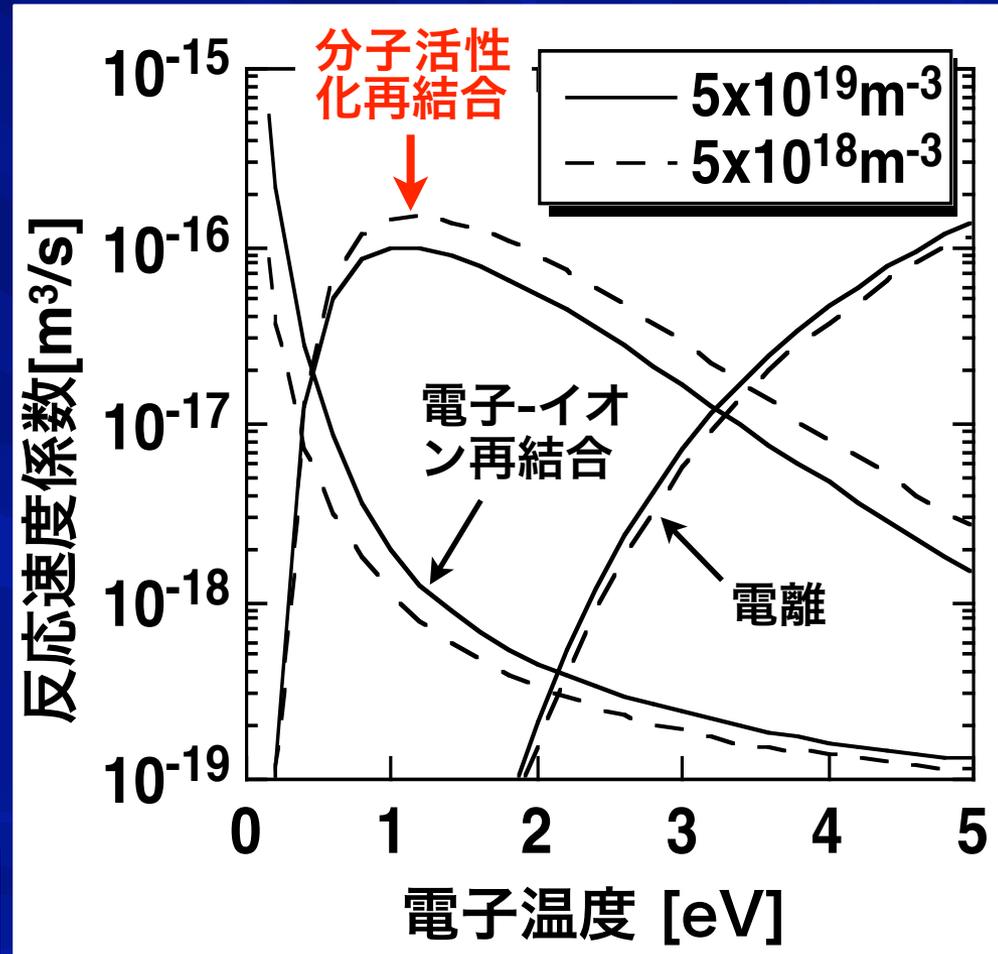
振動励起水素分子を起点とした一種の化学反応- 大きな反応確率

粒子バランス

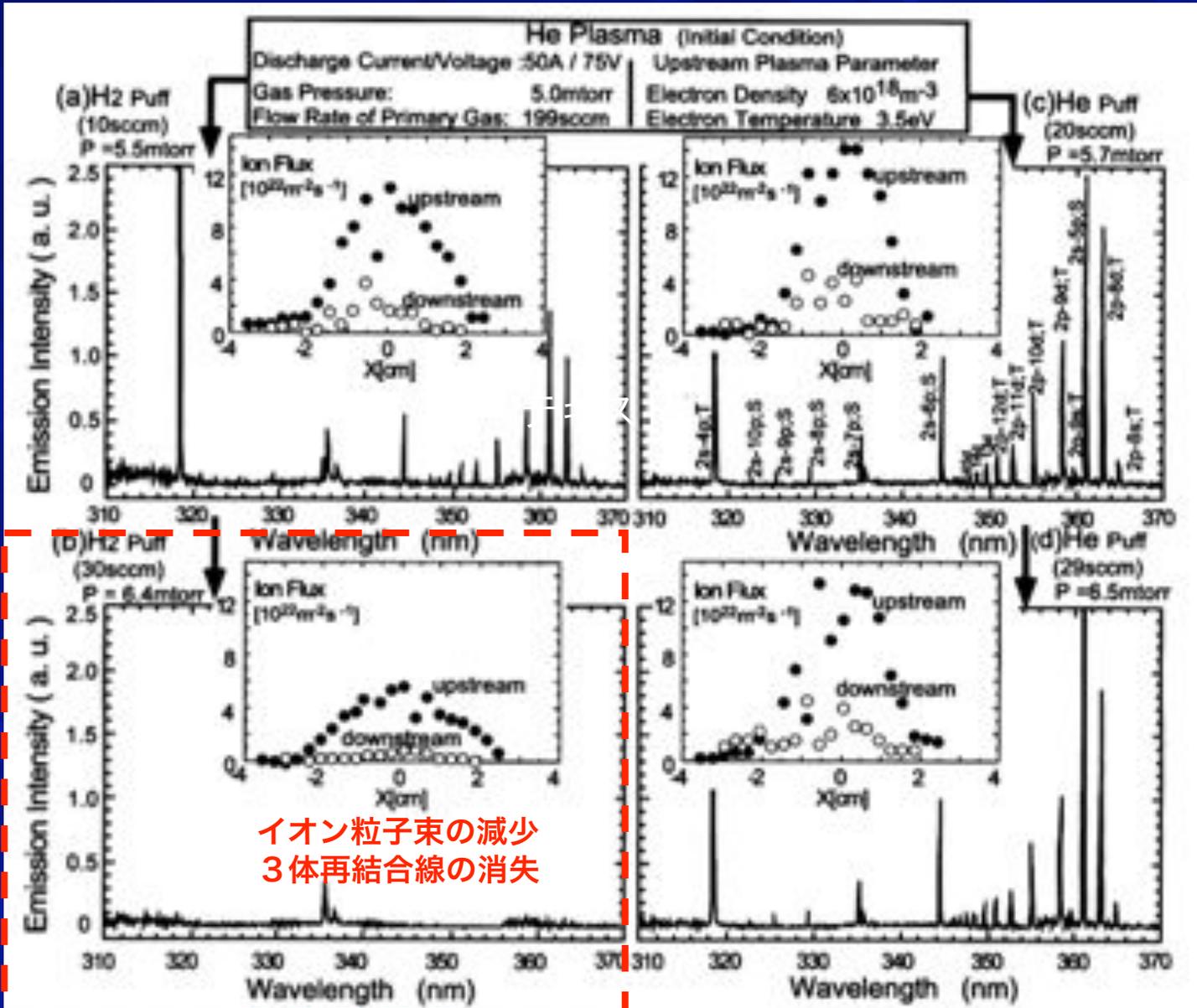
$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = \langle \sigma v \rangle_{\text{ion}} n_e n_n - \langle \sigma v \rangle_{\text{EIR}} n_e^2$$

$$- \langle \sigma v \rangle_{\text{MAR}} n_e n_{\text{H}_2}$$

水素分子密度も重要!



分子活性化再結合過程の実験的検証



水素ガス
導入

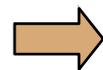
イオン粒子束の減少
3体再結合線の消失

ヘリウム
ガス導入

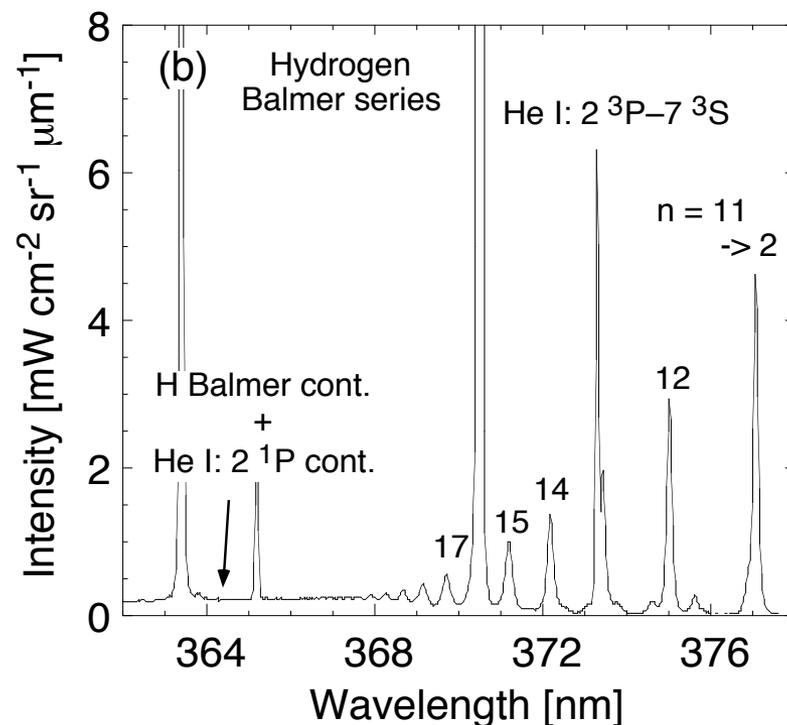
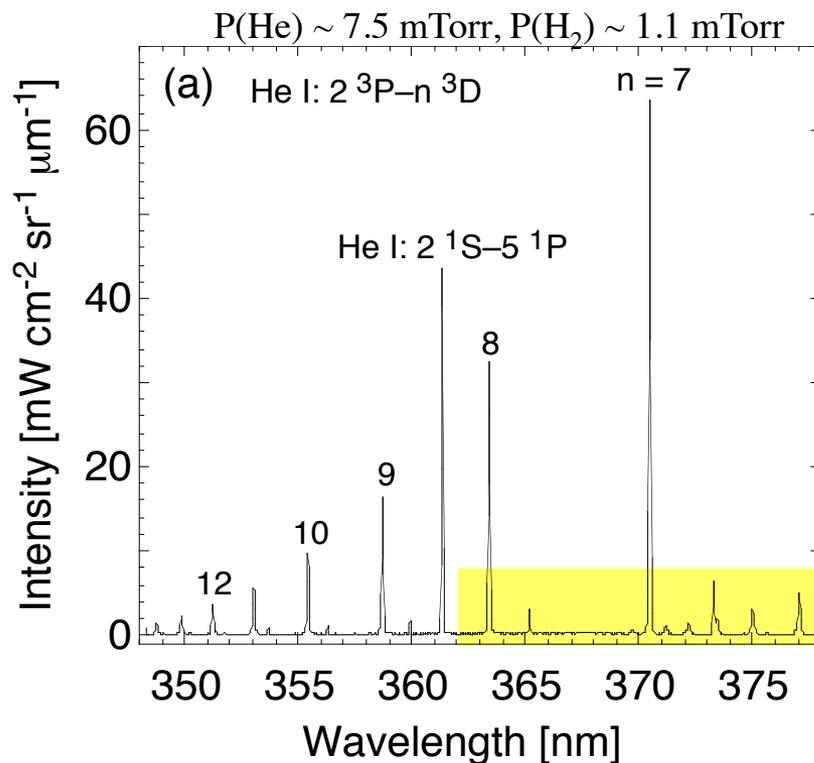
ヘリウム-水素混合プラズマからの 発光スペクトル

NAGDIS-II

水素及びヘリウムの高励起準位からの線スペクトル群の観測

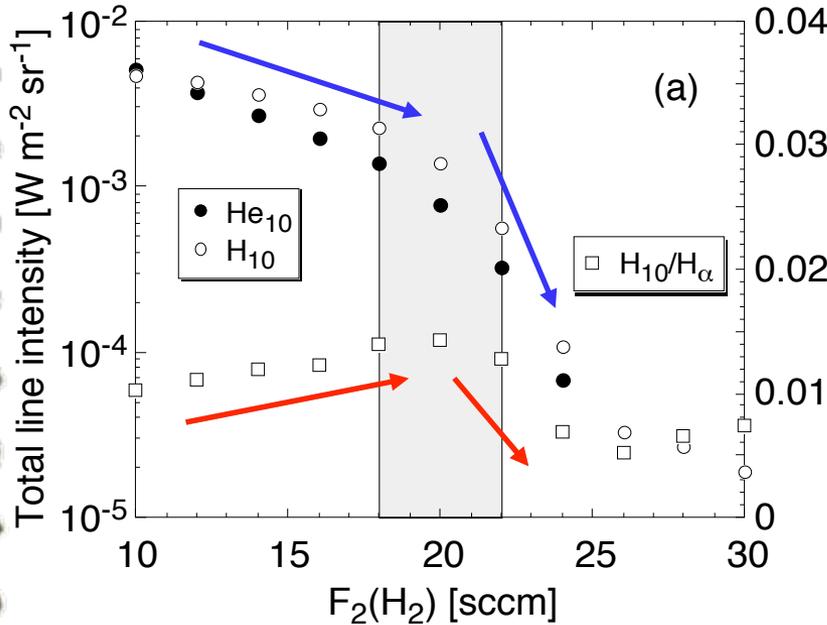


放射及び三体再結合の発生
分子活性化再結合?



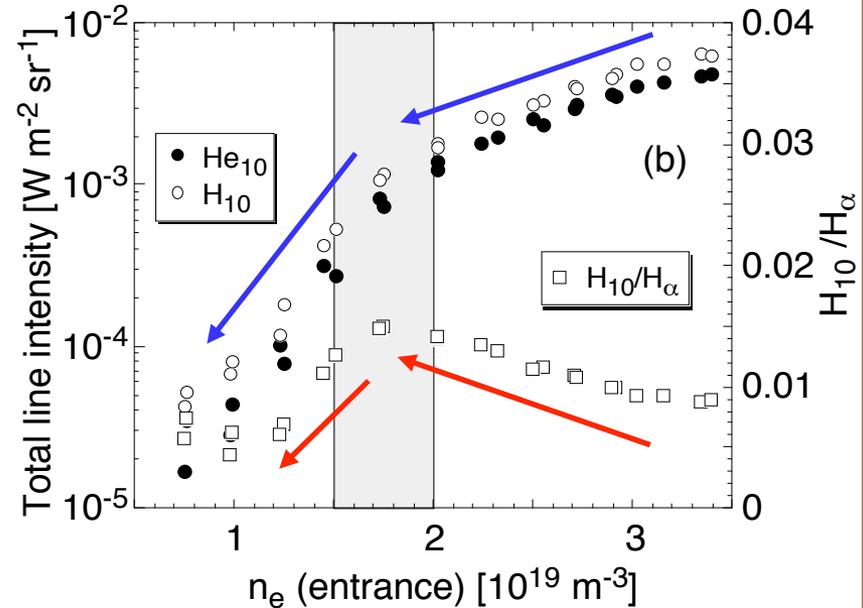
発光強度の水素ガス流量及び 電子密度依存性

NAGDIS-II



ハッチされた領域で
急激な発光強度の低下
EIRの抑制

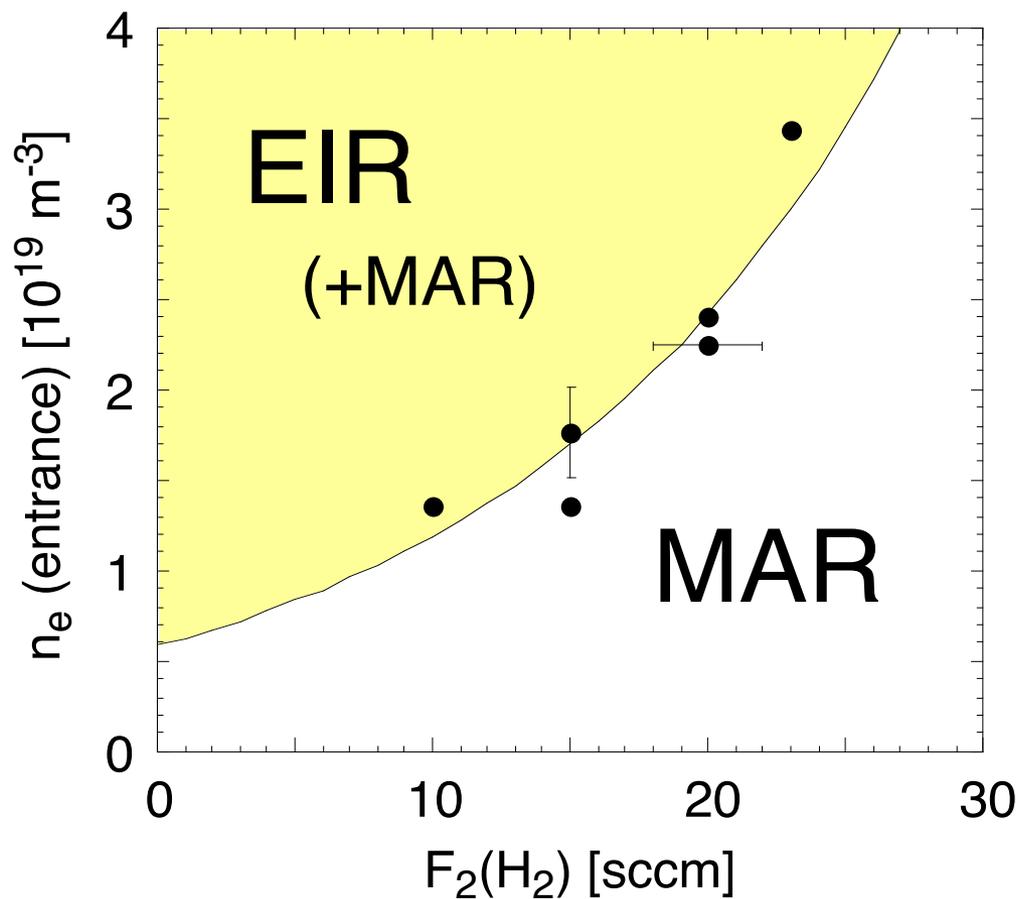
H_{10}/H_{α} の急激な減少
 → MARによる $n = 3$ 準位の
 占有密度の上昇



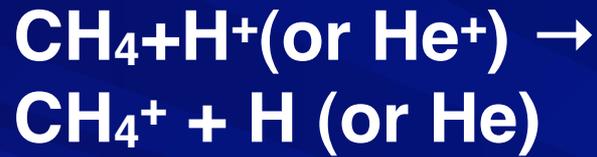
$n_e(\text{entrance})$ - $F_2(\text{H}_2)$ 平面における

EIR/MARの発生境界

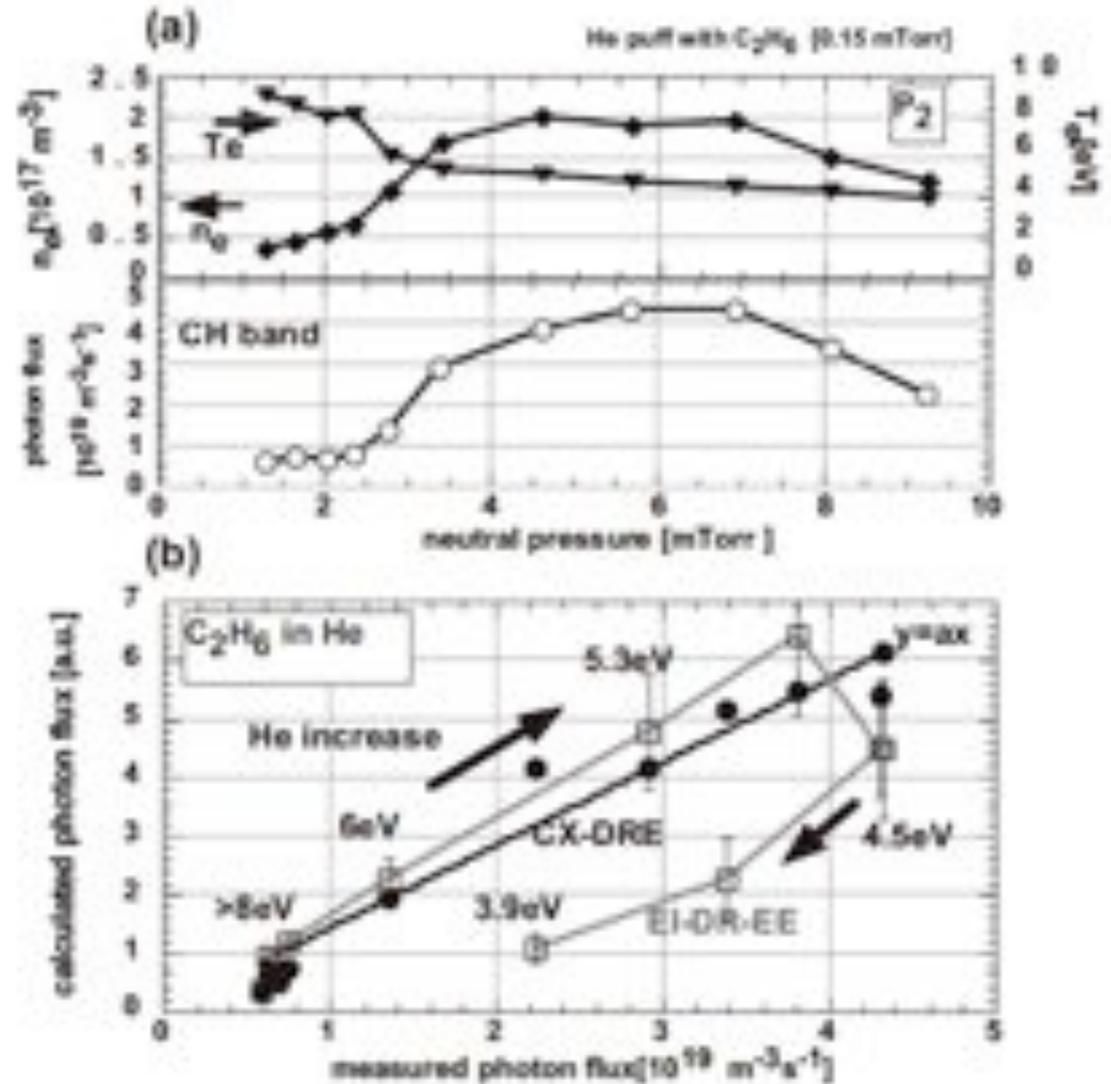
NAGDIS-II



炭化水素分子活性化再結合の実証



MAP-IIでの
実験的検証



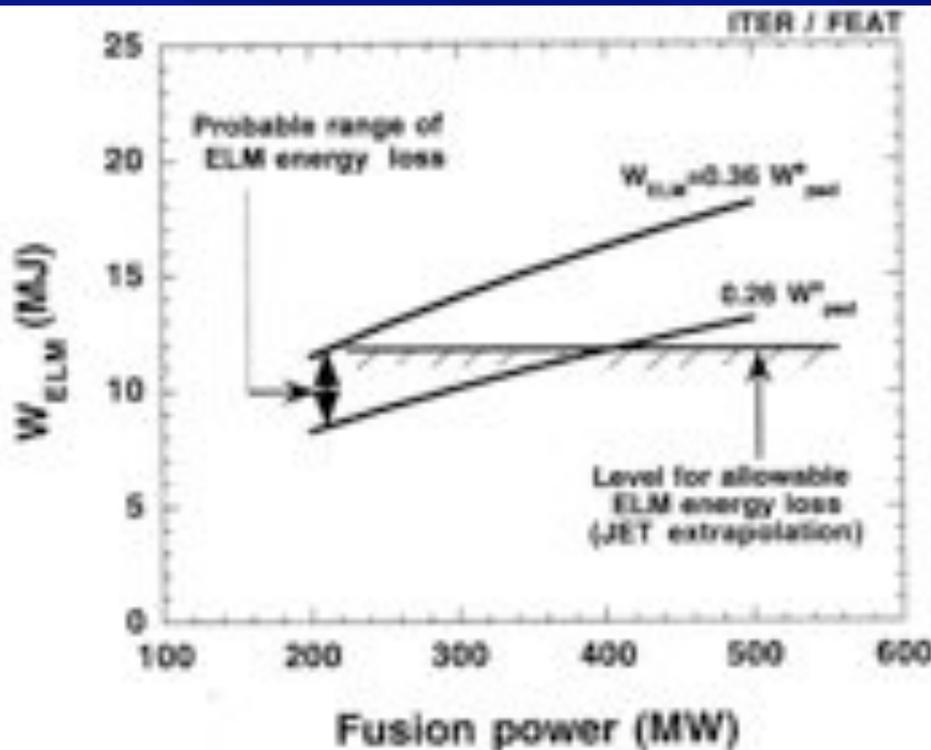
ダイバータ板へのELMによる熱負荷の評価

許容ELMエネルギー

$$W_{ELM}^{Allowable} \approx 12 MJ \quad \Leftrightarrow \Delta T \propto W_{ELM} / S_{area} \sqrt{t} \leq 45 MJ / m^2 s^{0.5}$$

Criteria for surface temperature rise of CFC

$$S_{area} \sim 16 m^2 \quad t \sim 0.15 msec$$

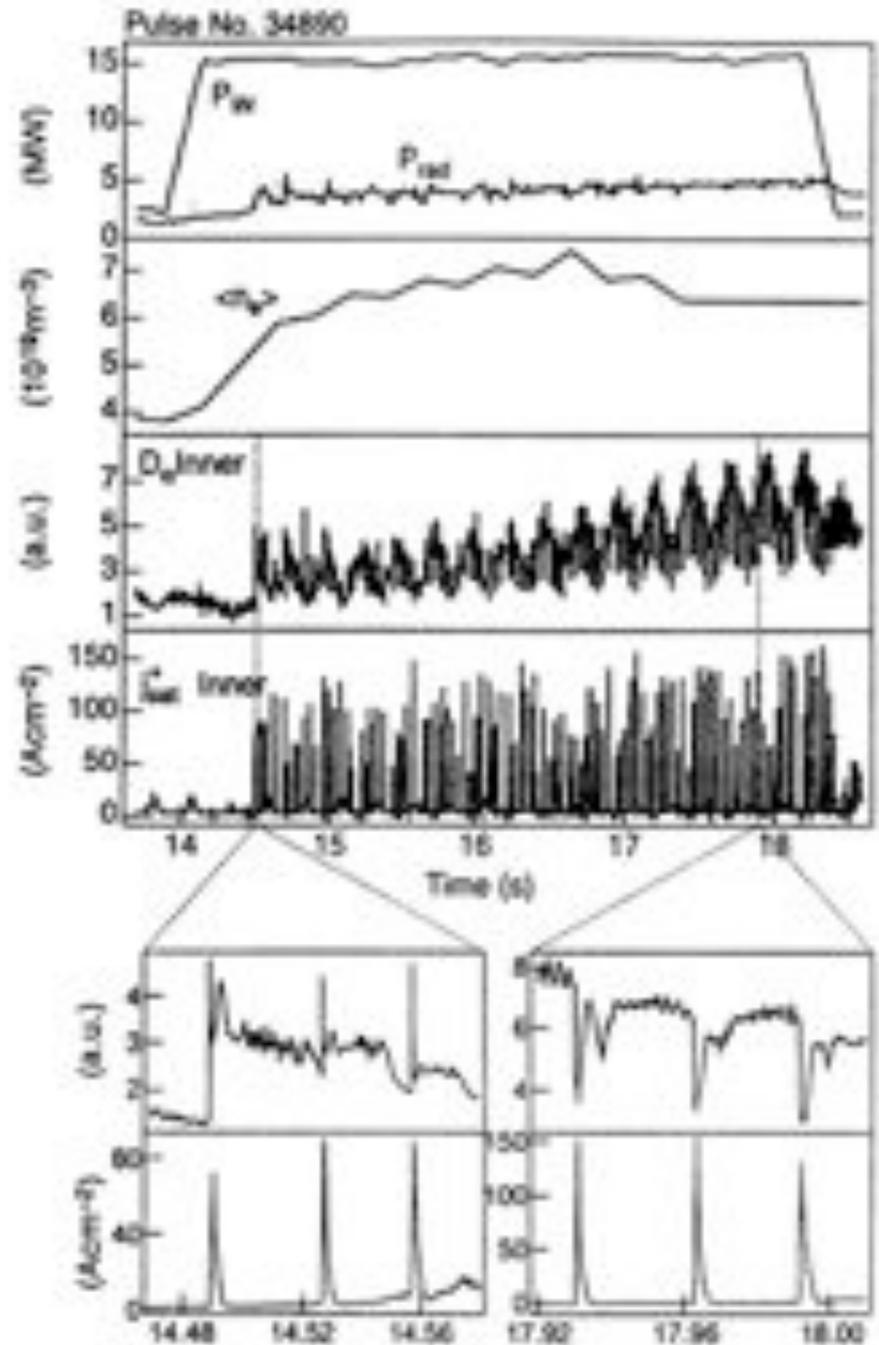


非接触プラズマは
ELM熱流制御にも有
効か？

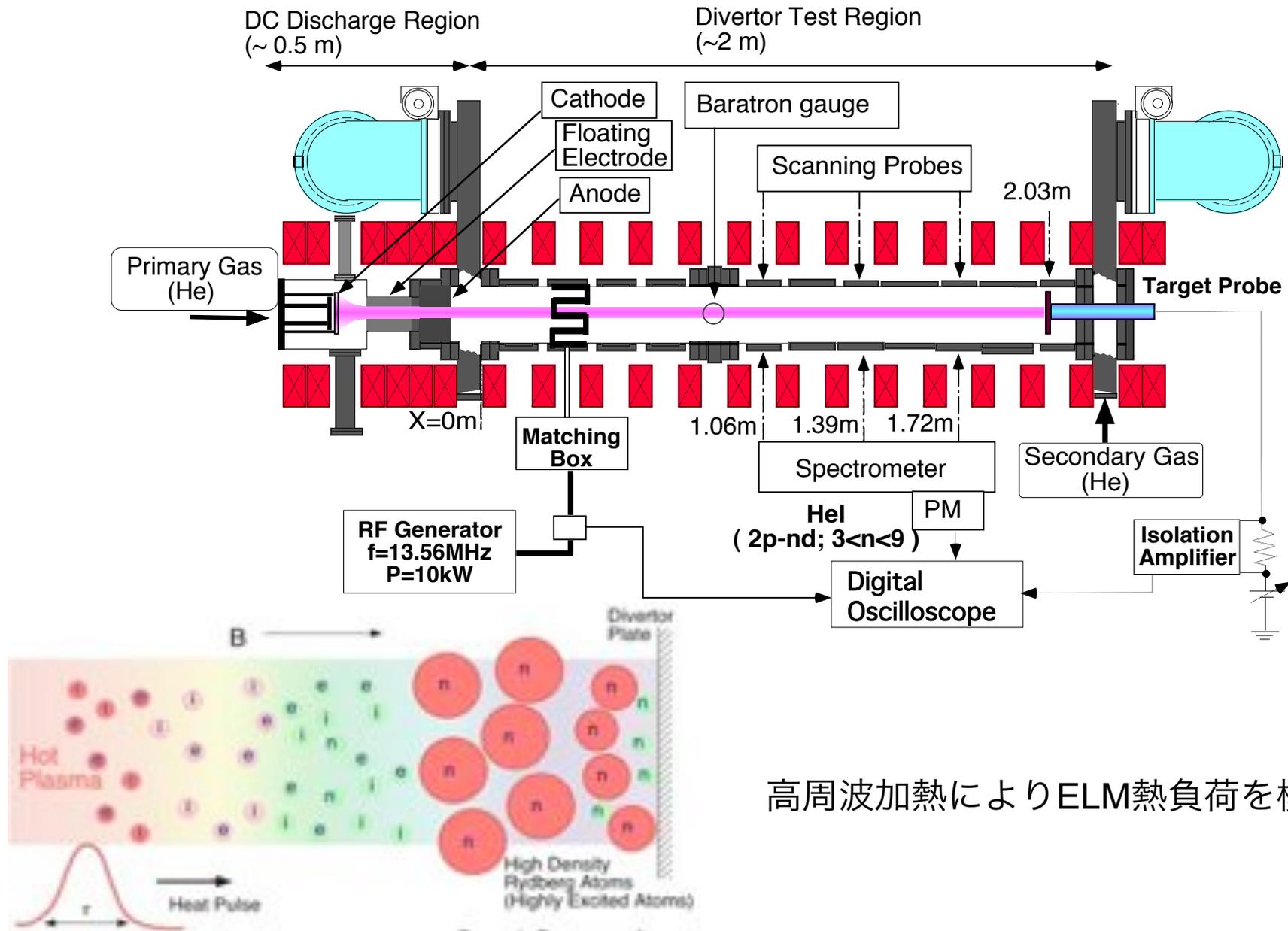
非接触プラズマと ELM の相互作用 (トカマク実験)

Two negative peaks
(negative ELM) appears
in $D\alpha$ emission.

A. Loarte et al.
Nuclear Fusion 38(1998)331.

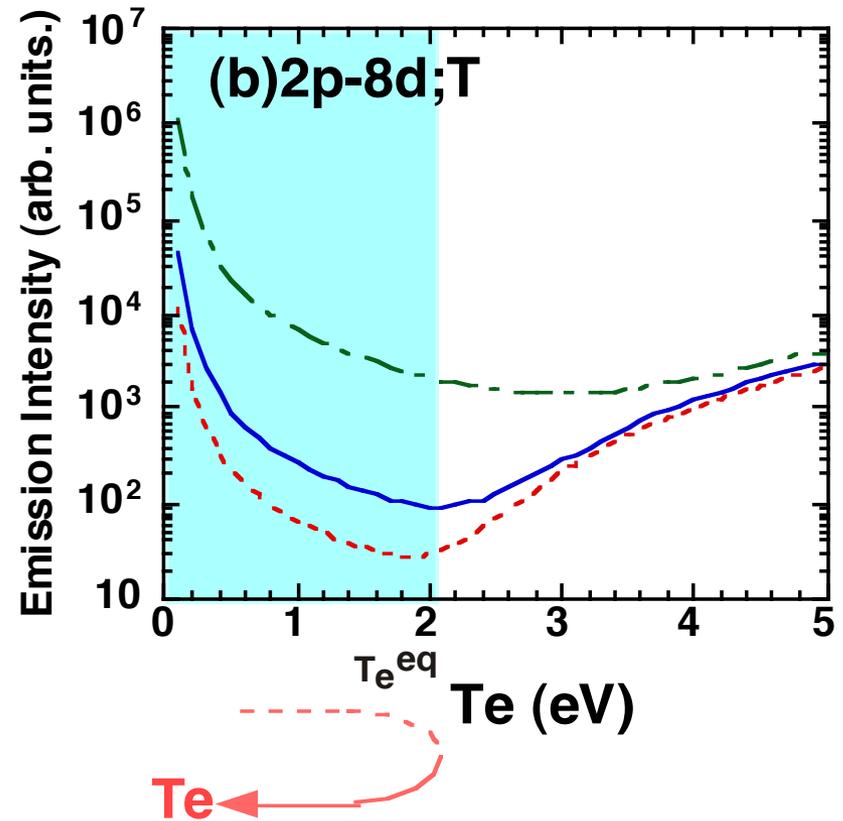
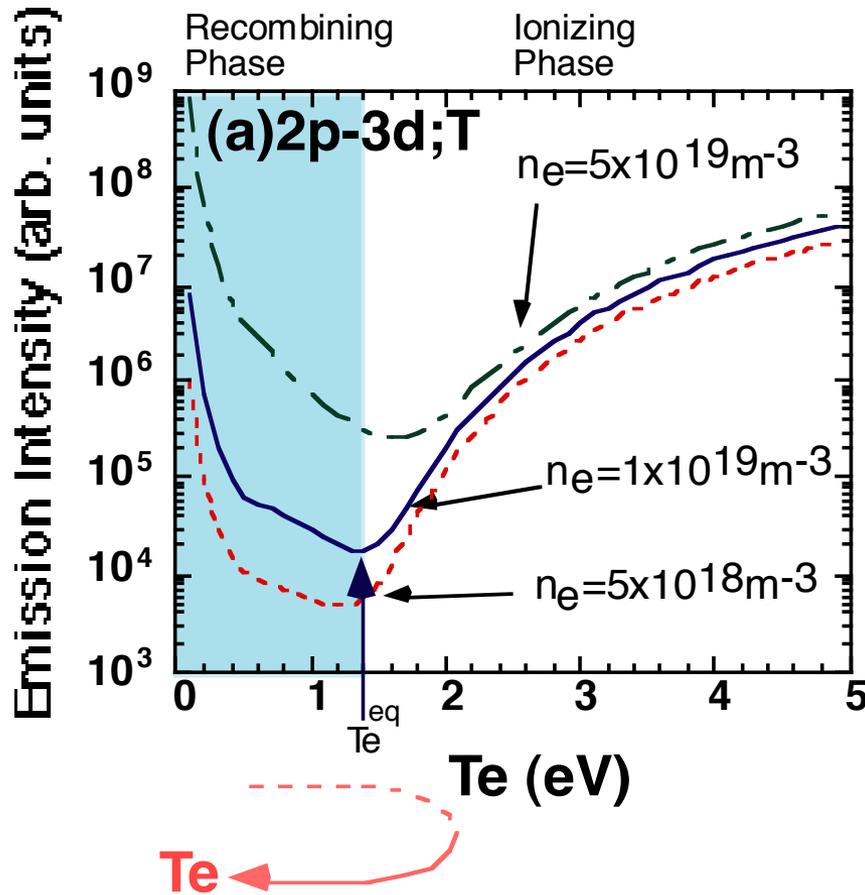


ELM熱負荷模擬実験



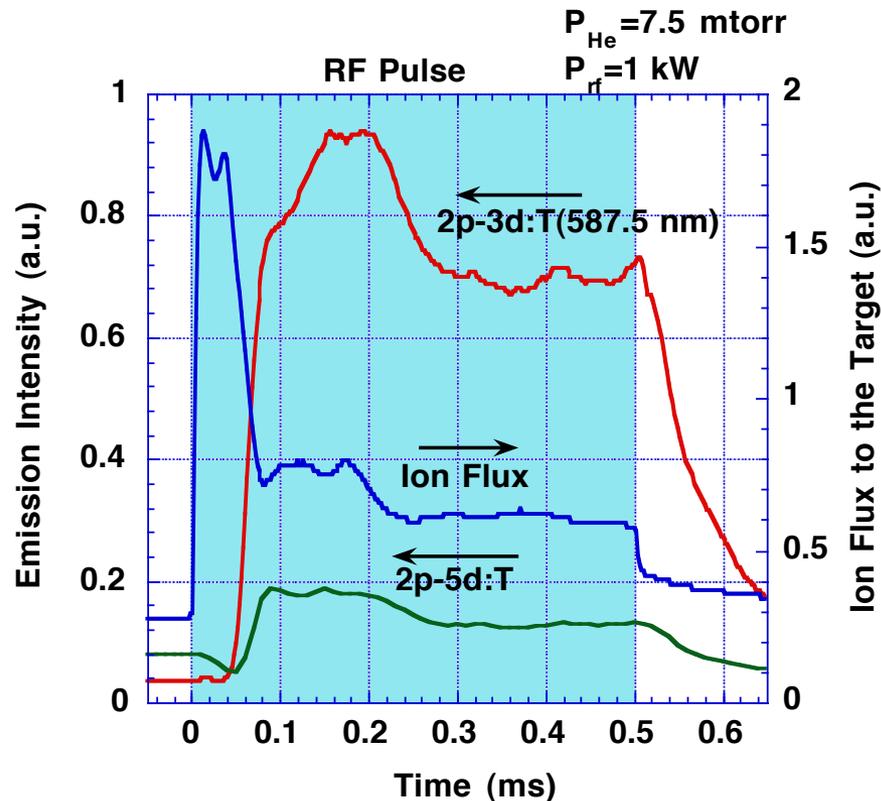
高周波加熱によりELM熱負荷を模擬

衝突輻射モデルによるNegative Spikeの解析

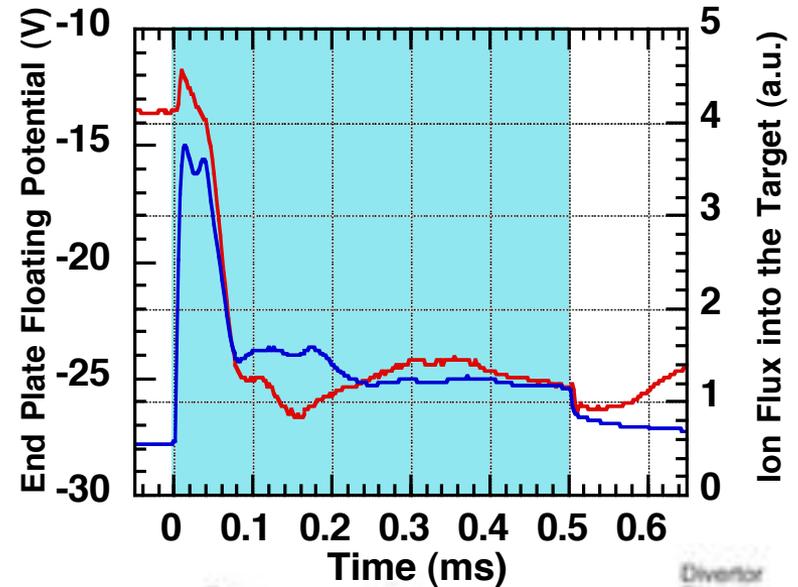


Transition between the ionizing phase and recombining phase gives minimum points

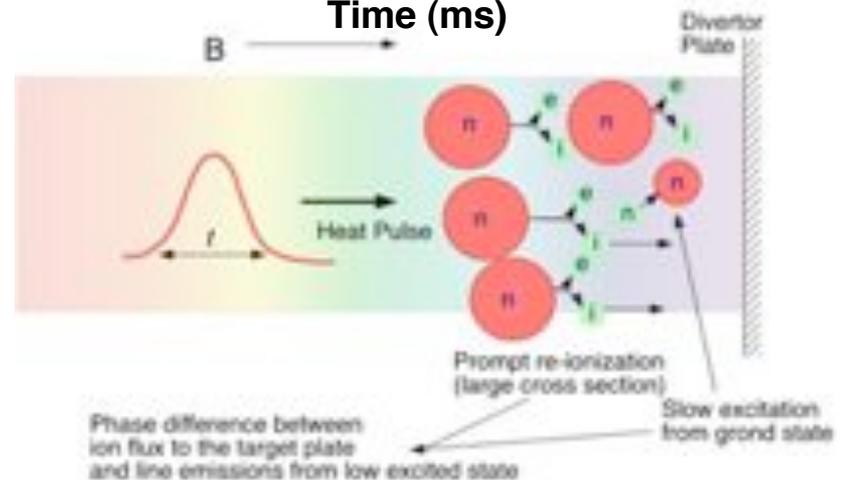
1st Negative Spikeの詳細観測



- Floating potential remains almost constant at 1st negative spike.

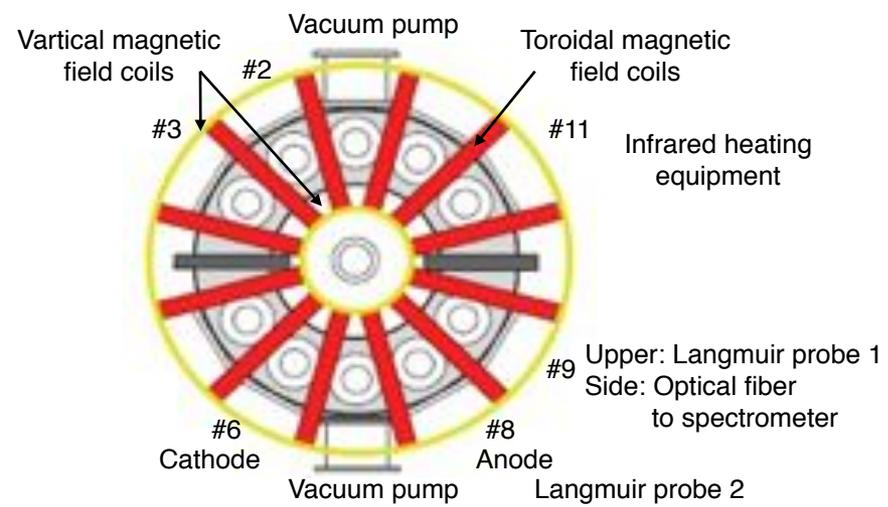
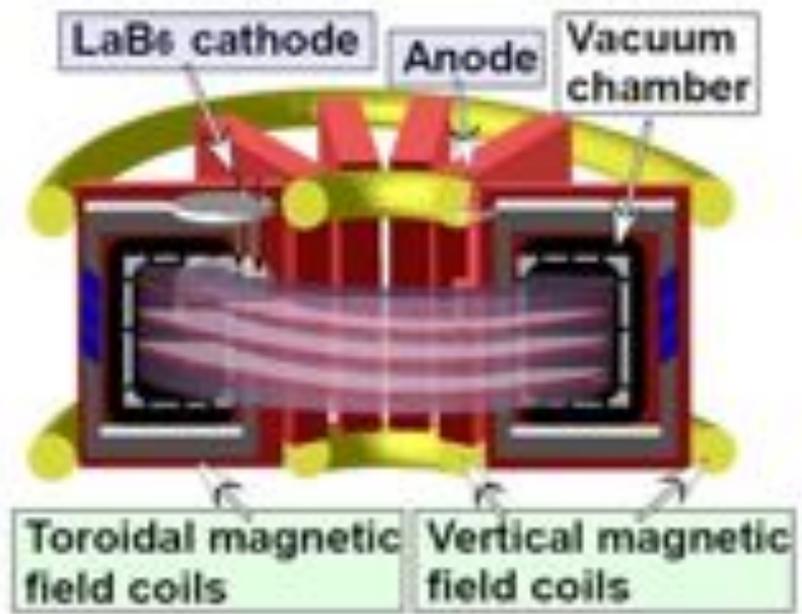


- Ion flux to the target plate is substantially increased near the 1st negative spike.

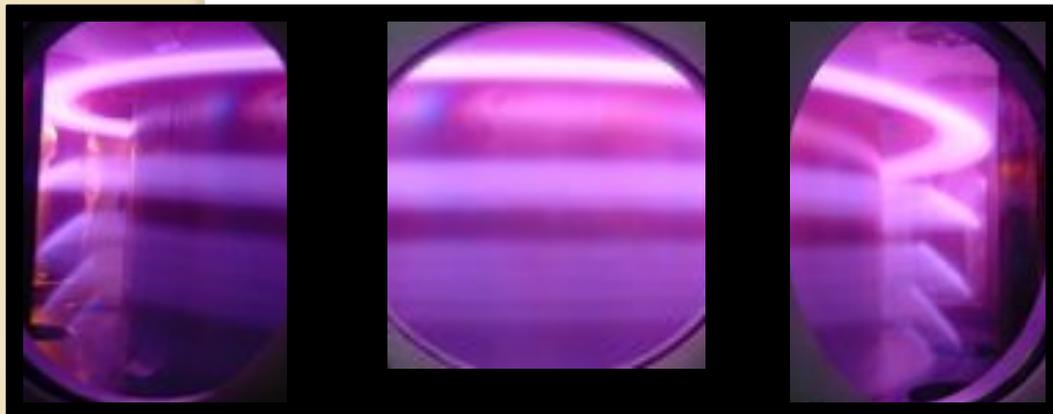
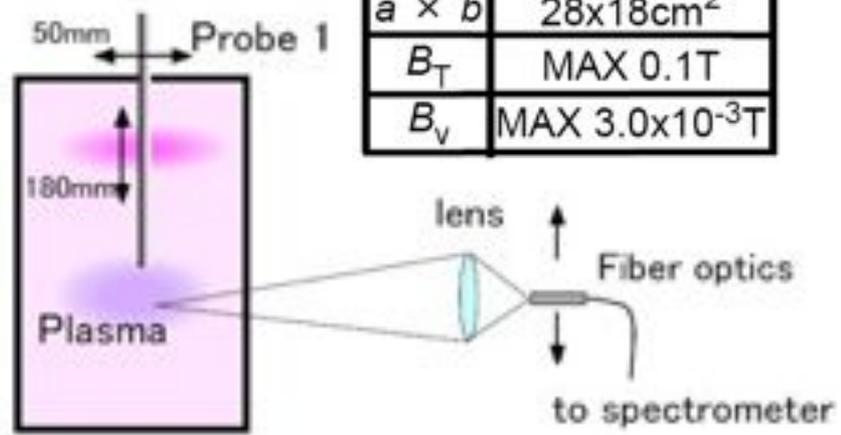


トロイダルダイバータプラズマ模擬試験装置 NAGDIS-T

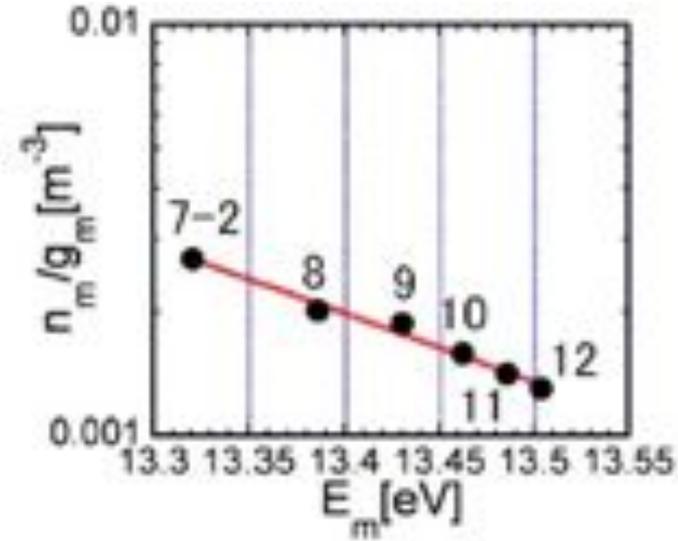
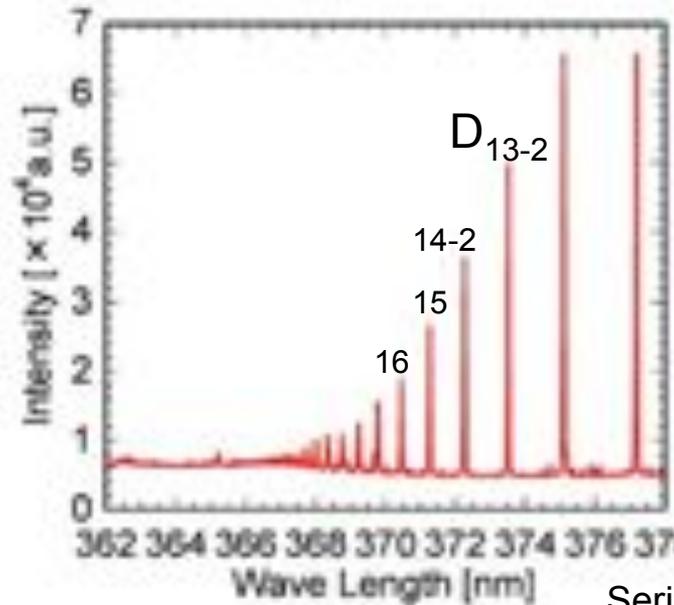
High density ($\sim 10^{19} \text{m}^{-3}$) deuterium plasma can be generated in steady state with a long magnetic connection length



R	34cm
$a \times b$	$28 \times 18 \text{cm}^2$
B_T	MAX 0.1T
B_V	MAX $3.0 \times 10^{-3} \text{T}$



非接触重水素プラズマの生成



$B_T : 4.2 \times 10^{-2} \text{T}$

$B_V : 1.5 \times 10^{-3} \text{T}$

$P : 0.59 \text{ Pa}$

Detached Deuterium Plasma

Series of visible line emissions
from highly excited levels
due to 3 body recombination

$T_e \sim 0.26 \text{ eV}$ evaluated by a Boltzmann plot method

$$\ln \left(\frac{n_m}{g_m} \right) = -\frac{E_m}{k_B T_e} + \text{const}$$

$n_e \sim 3.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ calculated from Stark broadening of D(2-12)

$$n_e [\text{m}^{-3}] = 1.45 \times 10^{19} (10 \times \Delta\lambda_{12} [\text{nm}])^{\frac{3}{2}}$$

周辺プラズマ領域での非拡散的径方向プラズマ輸送

第一壁近傍に比較的プラズマ密度が高く平坦化した領域(2nd SOL)が存在する

→ 第一壁でのリサイクリングの増加 → 不純物発生が増加

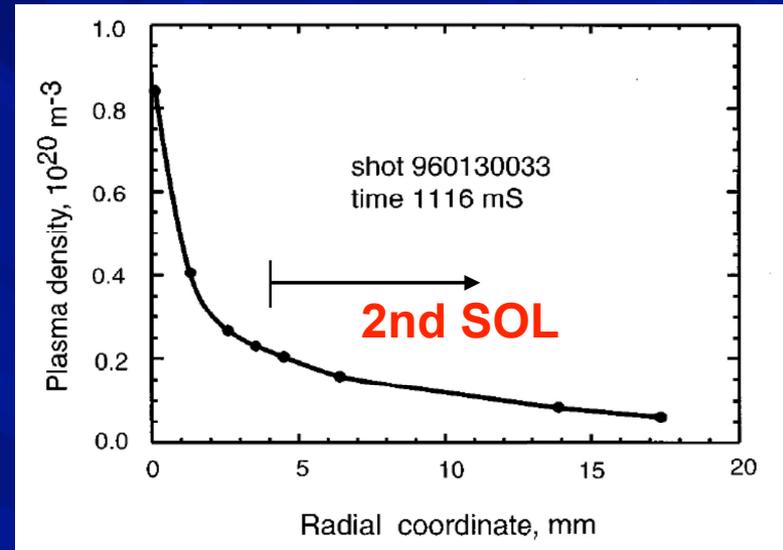
径方向拡散によるプラズマ輸送のみでは説明が困難

$$\Gamma_{\perp} = -D_{\perp} \frac{dn}{dr} + nV_{\perp}(r)$$

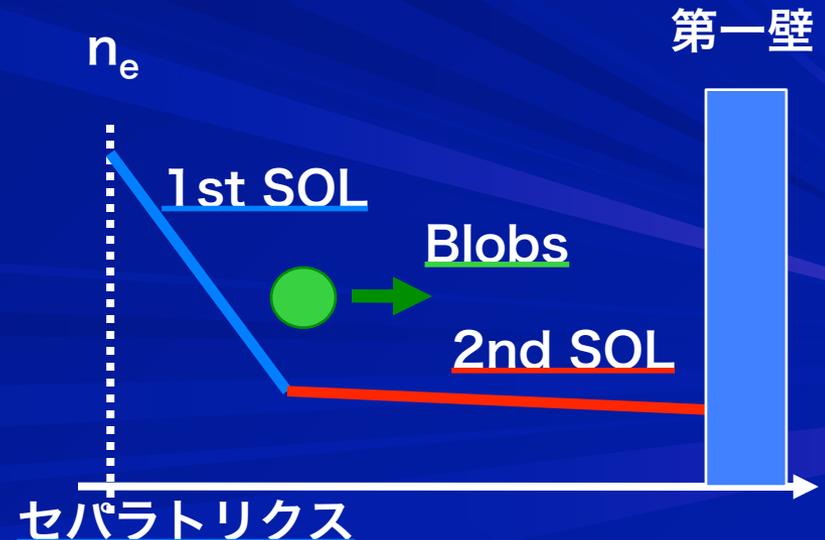
磁力線を横切る対流的プラズマ輸送？

→ **Plasma Blob輸送**

プラズマの塊(Blobs)が最外殻磁気面付近で生成され、磁力線を横切って第一壁に向かって飛行する現象



M. V. Umansky et al. Phys. Plasma 5, 3373(1998).



Plasma Blob輸送現象

境界領域・・・炉心プラズマを囲う開いた磁力線領域



スクレイプ・オフ層 (SOL) 領域

“Plasma Blob 輸送” の報告

- ① 磁力線に沿ってフィラメント状
- ② 磁場を横切り対流的に輸送
- ③ SOLプラズマに比べ高密度



- SOL中のプラズマ密度分布の平坦化
 - 径方向粒子束の50%程度を担う
- J.A. Boedo *et al.*, Phys. Plasmas **8** (2001) 4826.



トカマク装置の模式図

境界領域中における磁場を横切る非拡散的輸送現象

⇒ 粒子・熱輸送や不純物制御に大きく影響

Plasma Blob輸送の実験計測

Plasma Blob輸送・・・多数の中・小型トカマク装置のSOL領域中で観測

径方向サイズ: 5mm~3.9cm

径方向速度: 250m/s~2.7km/s

⇒ 定点への滞在時間: ~数十 μ s

計測器の高時間分解能化に伴って
発見された新しい研究課題

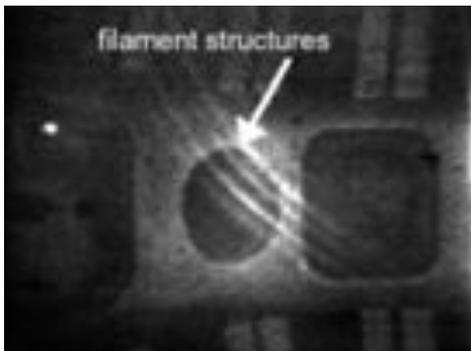
J.A. Boedo *et al.*, Phys. Plasmas **8** (2001) 4826.

G.S. Kirnev *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **46** (2004) 621.

よく用いられる計測系

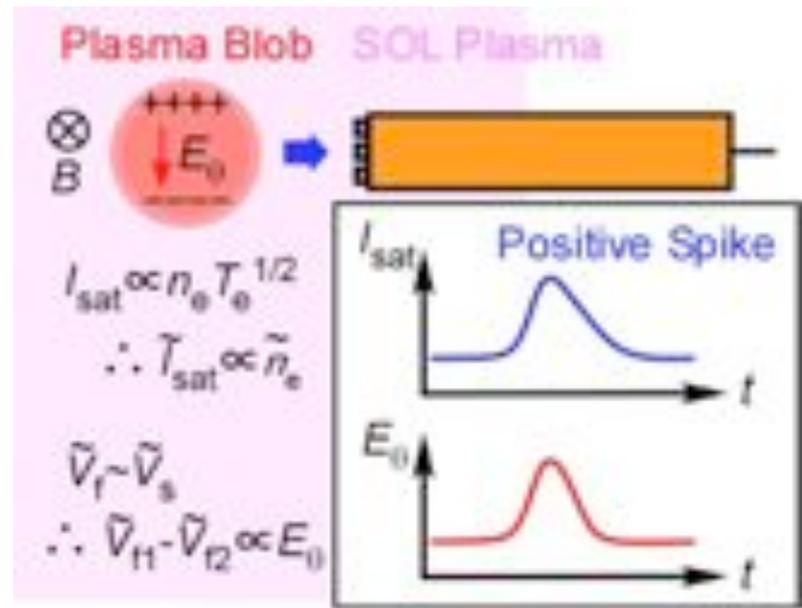
- 静電プローブ計測
(イオン飽和電流、浮遊電位、etc...)
- 高速カメラ計測

NSTXで観測されたD α 発光



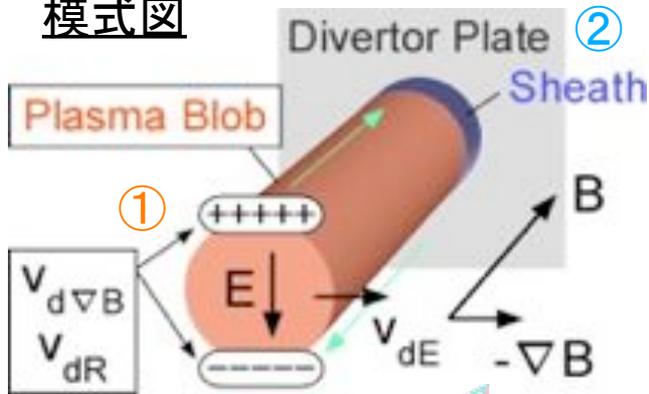
R.J. Maqueda *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72** (2001) 931.

プローブ計測の模式図

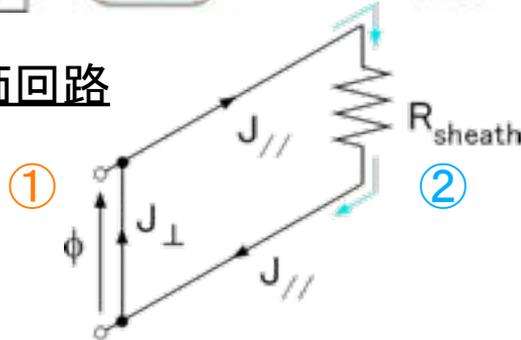


Plasma Blob輸送研究課題

模式図



等価回路



Plasma Blob輸送理論

S.I. Krasheninnikov, Phys. Lett. A **283** (2001) 368.

〔 炉心からPlasma Blobが剥離して
フィラメント状構造を形成 〕

①磁場勾配・曲率効果により荷電分離が発生

②シース抵抗により分極を保持

電場Eと磁場BのExBドリフトにより輸送



- ①・・・イオンと電子の分極により電場Eが生成
- ②・・・回路に流れる電流が抵抗Rに制限され電場Eが保持される

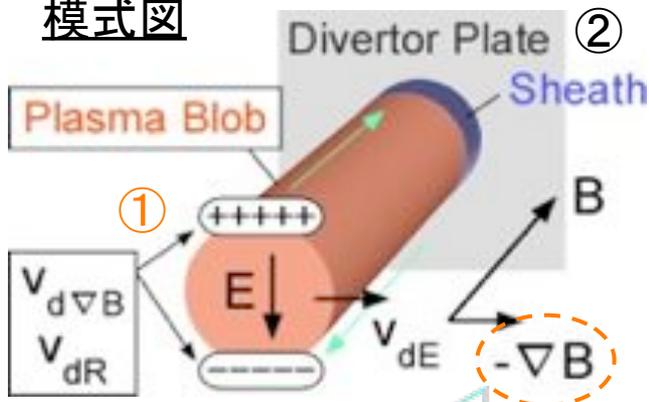
電場Eの決定

・・・輸送速度 ($\propto E$)・輸送距離に大きく影響

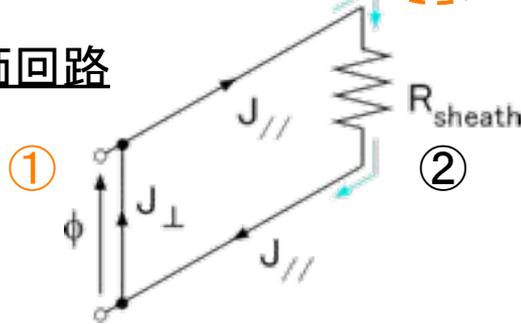
実験的な検証は不十分

磁場構造・配位に対する依存性

模式図



等価回路



Plasma Blob輸送理論

S.I. Krasheninnikov, Phys. Lett. A **283** (2001) 368.

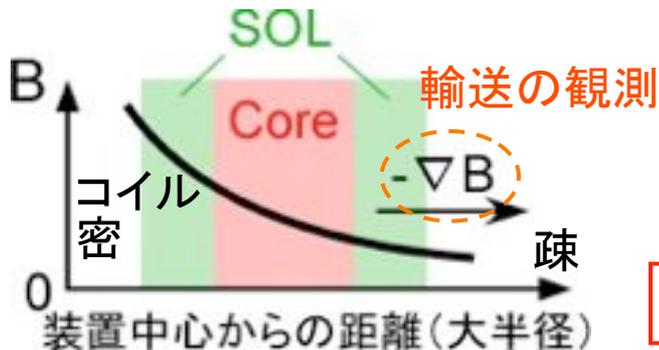
〔 炉心からPlasma Blobが剥離して
フィラメント状構造を形成 〕

①磁場勾配・曲率効果により荷電分離が発生

②シース抵抗により分極を保持

電場Eと磁場BのExBドリフトにより輸送

トカマク装置の磁場強度分布



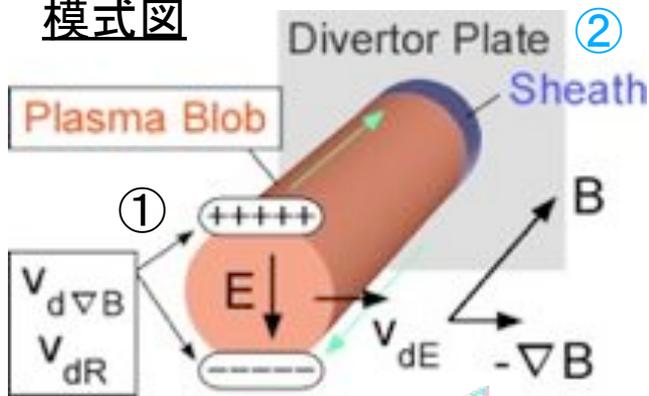
現象は輸送位置での磁場構造特性に依存？

- ・内側SOL (B大)での計測実施例は限られる
- ・他の磁場配位装置 (例:ヘリカル)での検証例はトカマク装置と比べて少ない

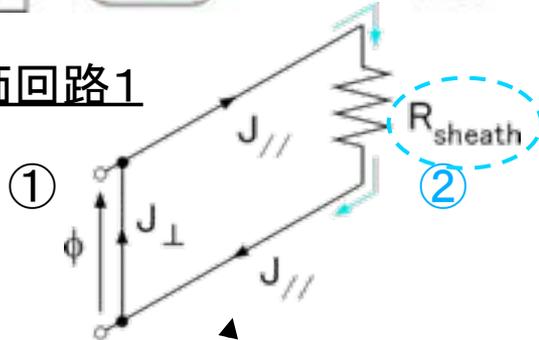
異なる磁場構造位置・磁場配位での検証が必要

分極保持抵抗

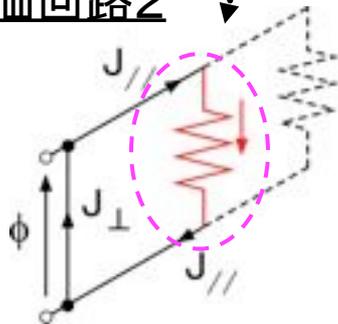
模式図



等価回路1



等価回路2



Plasma Blob輸送理論

S.I. Krasheninnikov, Phys. Lett. A **283** (2001) 368.

〔 炉心からPlasma Blobが剥離して
フィラメント状構造を形成 〕

①磁場勾配・曲率効果により荷電分離が発生

②シース抵抗により分極を保持

電場Eと磁場BのExBドリフトにより輸送

近年の理論研究

等価回路がダイバータ上流位置で閉じている可能性の指摘

〔 Plasma Blob中の荷電粒子がダイバータ前面
のシースに到達する前に回路が短絡？ 〕

分極保持に実際に寄与する抵抗の位置は未解明

大型トカマク装置における輸送評価

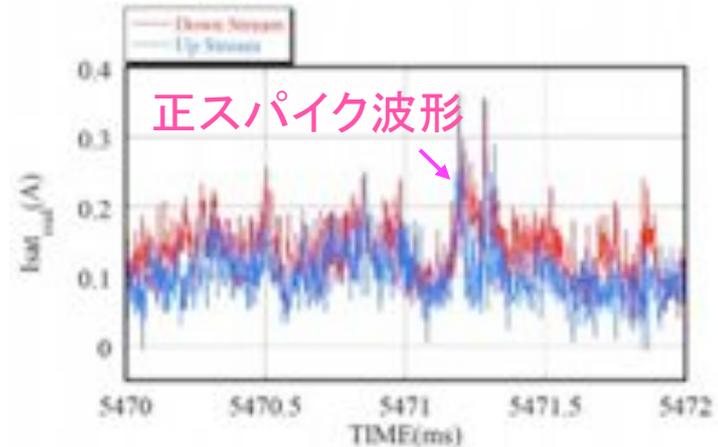
Plasma Blob輸送研究・・・中・小型トカマク装置におけるものがほとんど

大型トカマク装置における研究

JET ... 無し
JT-60U ...

三好秀暁:平成16年度名古屋大学修士論文

大型トカマク装置JT-60Uの弱磁場側
SOLで計測されたイオン飽和電流揺動



弱磁場側SOL中でのPlasma Blob
輸送の発生を示す結果のみ



大型装置における詳細なPlasma
Blob輸送特性が示された例は無い

(輸送特性評価の外挿)

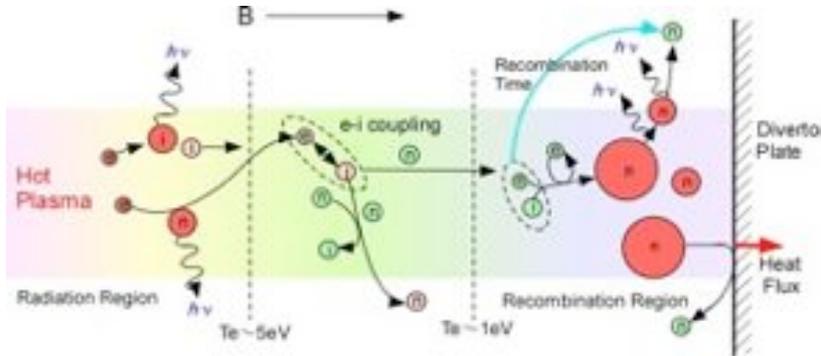
"超大型装置"ITERにおける研究

シミュレーション研究など

ITERへの評価の外挿性を
高めるために大型装置を用
いた評価は不可欠

非接触ダイバータ状態時の輸送特性

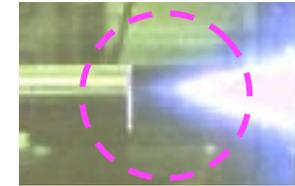
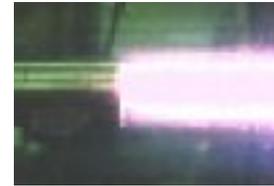
非接触ダイバータ領域中の輻射過程



非接触プラズマの典型写真

接触

非接触



中性ガス圧P増加

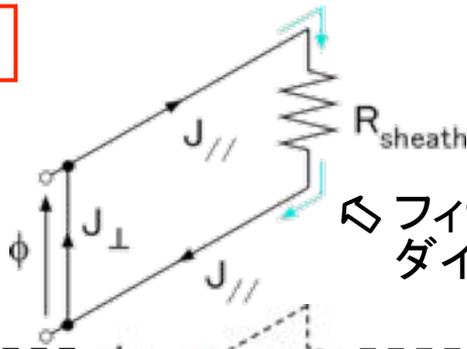
ダイバータ板への熱・粒子負荷低減に期待 (ITERでも採用予定)

接触状態時

非接触状態時

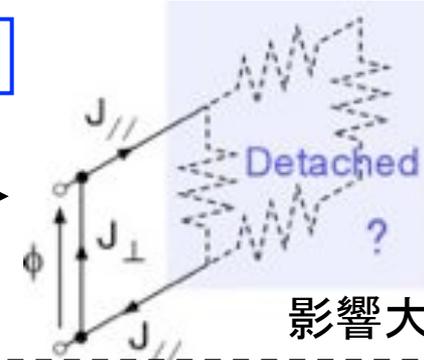
等価回路1

シース抵抗で分極保持



フィラメント構造がダイバータ板に接続

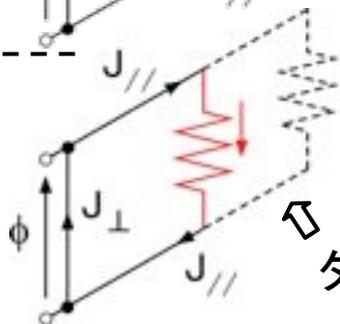
P大



影響大?

等価回路2

より上流で分極保持



ダイバータ板に未接続

P大

影響小?

核融合装置における実験的検証は無い

NAGDIS-IIにおける非拡散的輸送の観測

直線型ダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-II

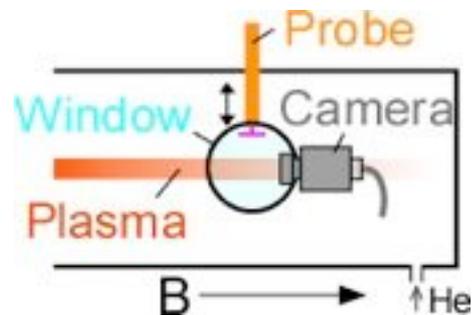
高速カメラ

$$n_e < 10^{20} \text{m}^{-3}$$
$$T_e \sim 10 \text{eV}$$



直線状の開いた磁力線領域に生成された
プラズマを側面から高速カメラにより計測

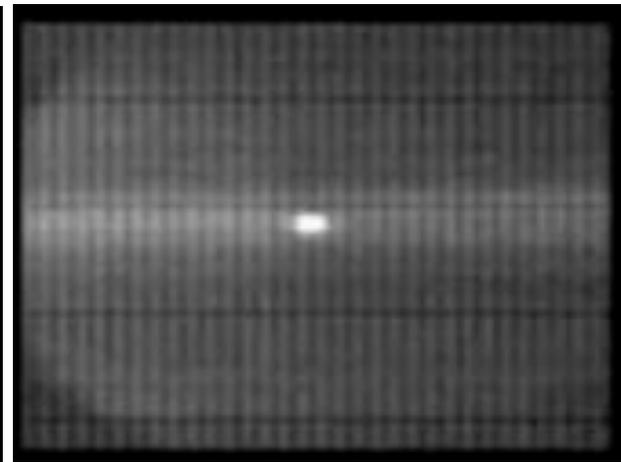
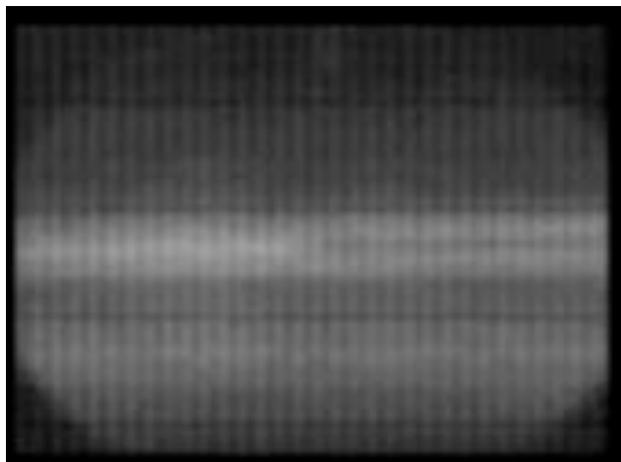
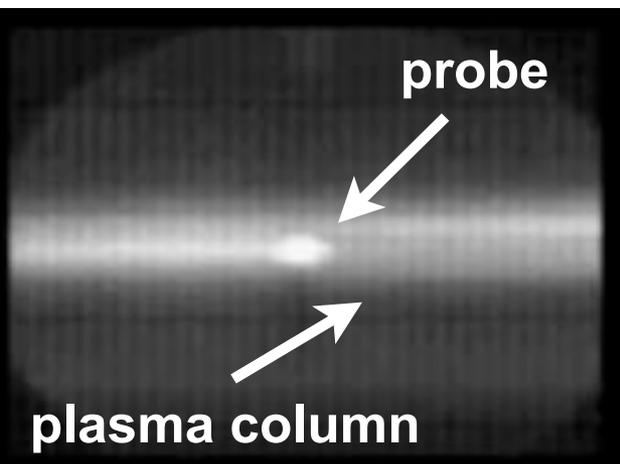
側面図



P=3.6mTorr

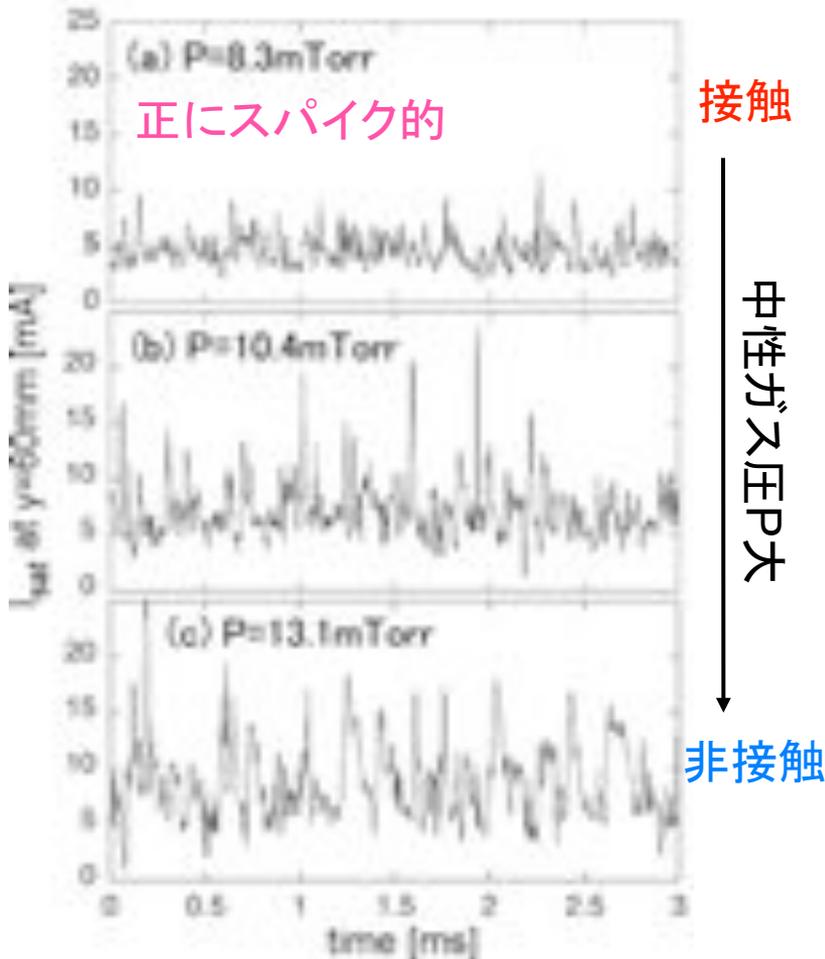
P=9.0mTorr

P=13.6mTorr



2次元Plasma Blob輸送挙動

直線型ダイバータ模擬試験装置NAGDIS-II
周辺位置で計測されたイオン飽和電流波形



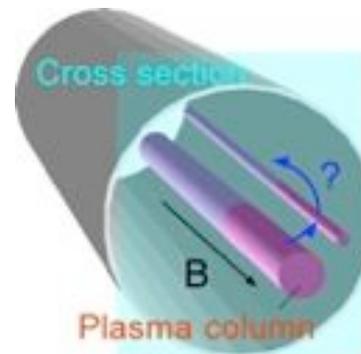
直線型装置を用いた接触・非接触状態時の静電揺動特性比較

Plasma Blob様の輸送(非拡散的輸送)の存在は確認済み

P大のとき揺動振幅・平均値増加

非接触ダイバータ状態時に輸送の増大を示唆

磁場を横切る2次元断面内のプラズマ輸送挙動は不明



輸送の正確な特性(速度・方向など)を評価できない

評価法の確立が急務

Plasma Blob輸送に関する研究課題のまとめ

トカマク . . . 径方向に進むにつれ磁場強度減少

- ・ トーラス内外（強磁場側・弱磁場側SOL）での輸送特性の違い
- ・ Plasma Blob等価回路の保持抵抗の位置

◌大型装置における詳細な評価◌

ヘリカル . . . 3次元的な磁場構造

- ◌ Plasma Blob輸送発生の有無
- ・ 輸送方向や発生領域の解明

直線型 . . . 単純な磁場配位

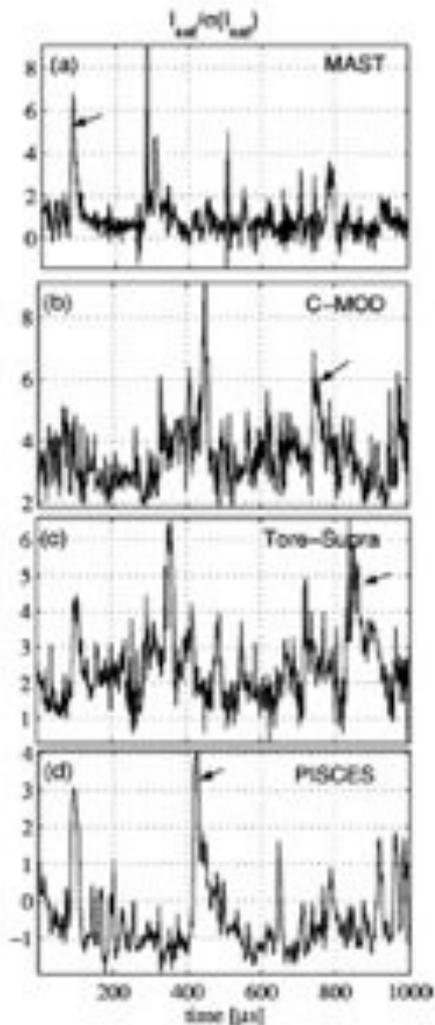
◌磁場と直交する2次元断面内における輸送の動的挙動評価法◌

装置共通 . . . 非接触ダイバータ状態における輸送特性

揺動信号解析

解析対象・・・高時間分解能の揺動信号

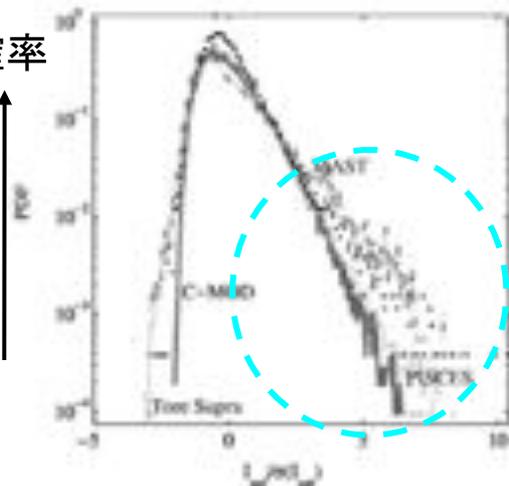
イオン飽和電流波形



流体乱流分野で開発・改良されてきた「統計的解析手法」に着目・適用

確率密度関数(PDF)

確率



規格化した揺動振幅
 $(I - \mu) / \sigma = \tilde{I} / \sigma$

Skewness

$$S = \langle \tilde{I}^3 \rangle / \sigma^3 = \langle (\tilde{I} / \sigma) \rangle$$

$\langle \rangle$: アンサンブル平均

Plasma Blob検出時 $S > 0$

μ : 平均値, σ : 標準偏差

○ Plasma Blob 輸送研究に
適用例のある手法

⇒ 中・小型トカマクとの比較

○ 適用例の無い新規手法

⇒ 新たな知見

G.Y. Antar *et al.*, Phys.
Plasmas **10** (2003) 419.

統計的解析手法

数値計算言語MATLABにより「統計的解析プログラム」を開発

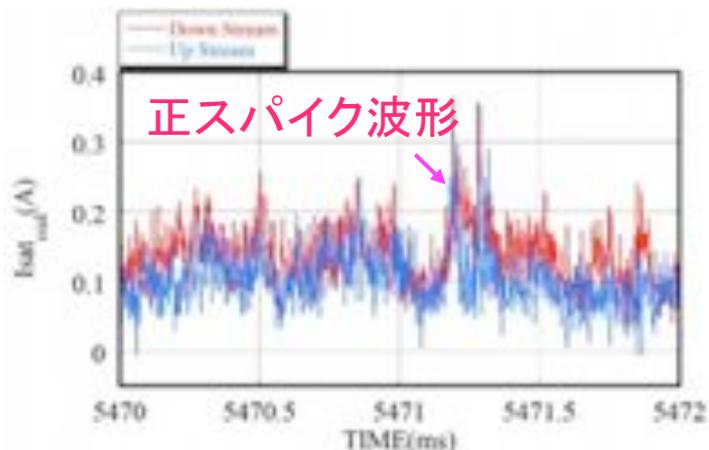
開発した解析プログラム

- 確率密度関数
 - ・同時確率密度関数
 - Skewness
 - Flatness (Kurtosis)
 - ・カルバックライブラーのダイバージェンス
 - ・Gram-Charlier級数展開
 - パワースペクトル
 - クロススペクトル
 - ・コヒーレンス
 - ・バイコヒーレンス
 - フーリエ変換フィルタ
 - ・フーリエ変換微分
 - 連続ウェーブレット変換
 - ・連続逆ウェーブレット変換
 - 自己・相互相関関数
 - 条件付き平均
 - VITA法
 - 待ち時間、持続時間分布
 - ・構造関数解析
 - 経験的固有直交展開
 - ・特異値分解 etc...
- Plasma Blob輸送研究において実績のいくつかある手法
- 新規適用によって良い結果の得られた手法

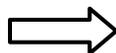
辻義之, 田中宏彦, 大野哲靖: プラズマ・核融合学会誌,
85 (2009) 620-630, 665-673, 774-782, 782-792.

大型トカマク装置中の輸送特性評価

大型トカマク装置JT-60Uの弱磁場側 SOLで計測されたイオン飽和電流揺動

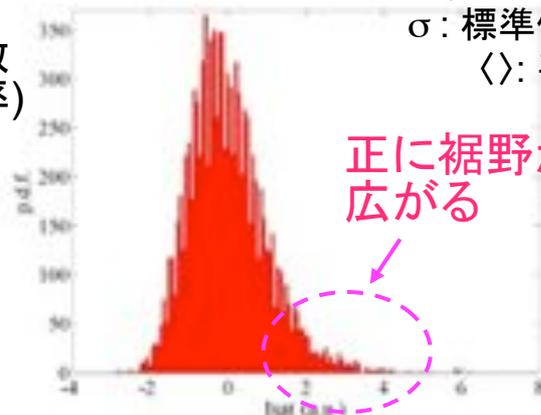


揺動
解析



確率密度関数

点数
(確率)



μ : 平均値
 σ : 標準偏差
 $\langle \rangle$: 平均

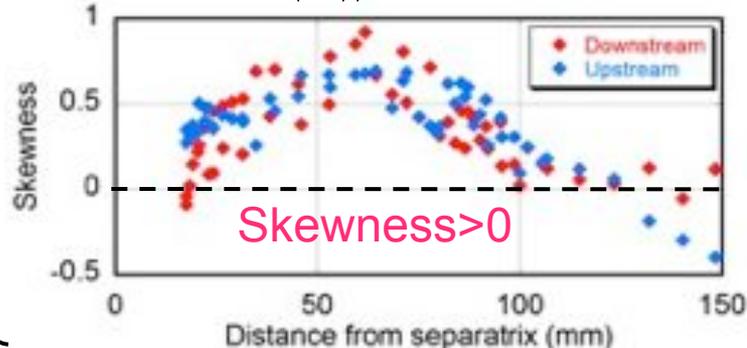
規格化振幅 $((I_{\text{sat}} - \mu)/\sigma = \tilde{I}_{\text{sat}}/\sigma)$

弱磁場側SOL中でPlasma Blob輸送の特徴

- ・正スパイク波形の観測
- ・確率密度関数の裾野が正に広がる
- ・Skewness > 0

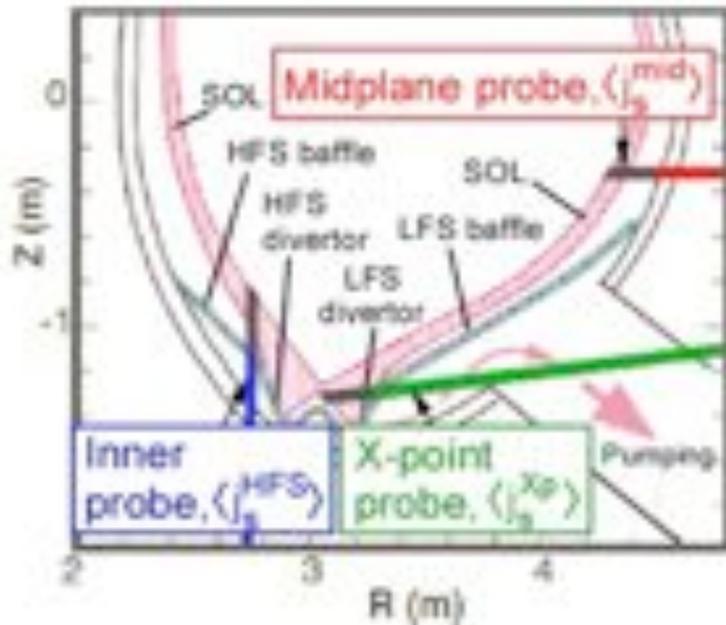
より詳細な解析例は無し

Skewness $(= \langle \tilde{I}^3 \rangle / \sigma^3)$ の径方向分布



JT-60Uにおける境界プラズマ揺動解析

JT-60Uポロイダル断面



弱磁場側SOL ⇔ 強磁場側SOLの比較

Plasma Blob輸送は弱磁場側SOLでのみ顕著に発生(理論と整合)

弱磁場側SOL ⇔ X点付近の比較

フィラメント構造はダイバータ板まで接続していない(保持抵抗は上流位置?)

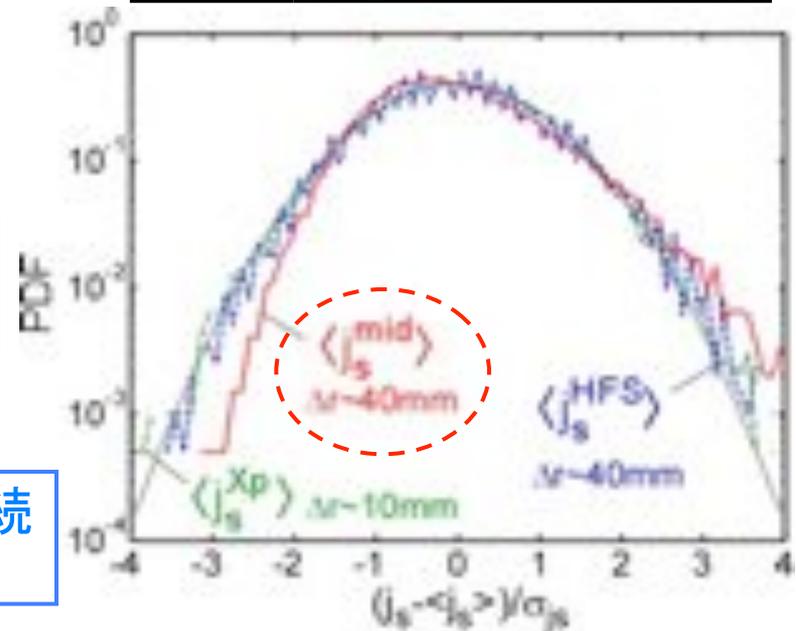
弱磁場側SOLの他、強磁場側SOLおよびX点付近においても信号を計測



異なるポロイダル位置で計測された静電揺動信号特性を比較

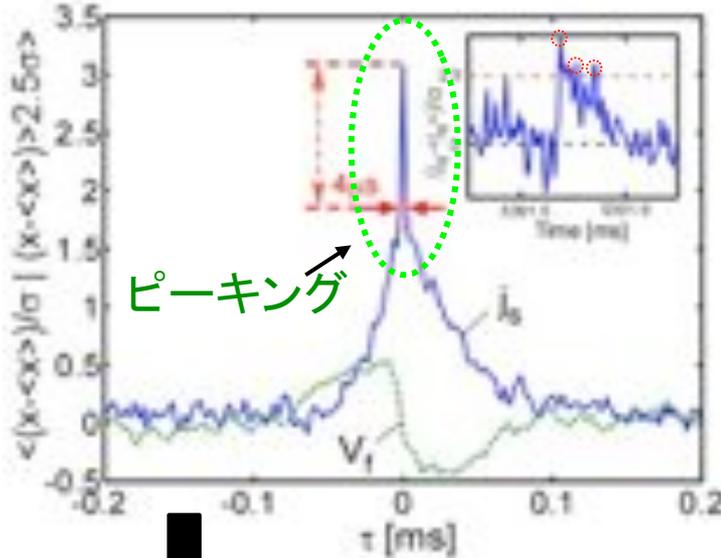
弱磁場側SOLでのみ確率密度関数の裾野が正に広がる ⇒ 正スパイク発生

L-mode放電での確率密度関数



典型的な正スパイク波形の抽出

条件付き平均波形

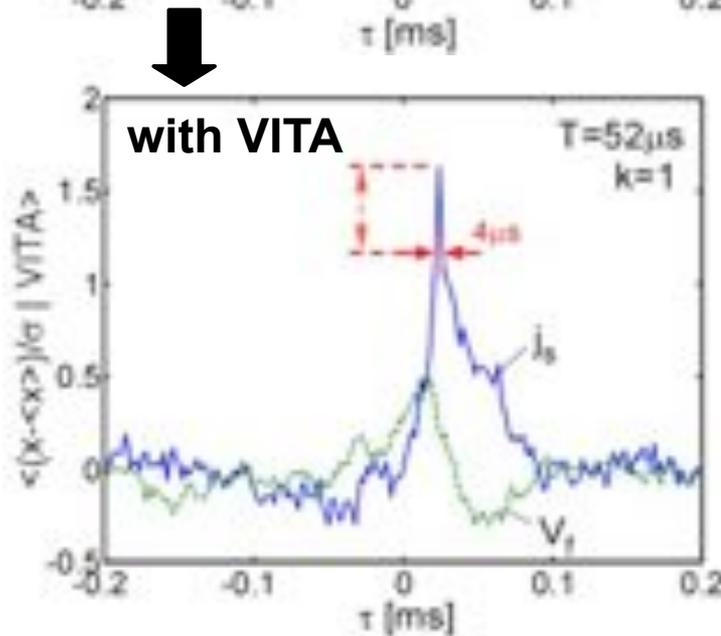


条件付き平均法・・・閾値などを基準として波形を検出、平均化して典型的なスパイク形状を得る

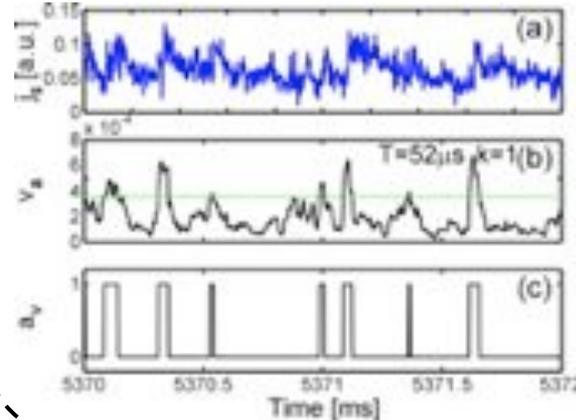
高周波ノイズの影響により波形のピーキング

↓ (ローパスフィルタの使用は控えたい)

Plasma Blob輸送研究で初めてVITA法を適用



VITA法



局所平均

$$\langle j_s \rangle_s(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} j_s(t') dt'$$

局所分散 (移動分散)

$$v_a = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (j_s(t') - \langle j_s \rangle_s(t))^2 dt'$$

$$a_v(t)$$

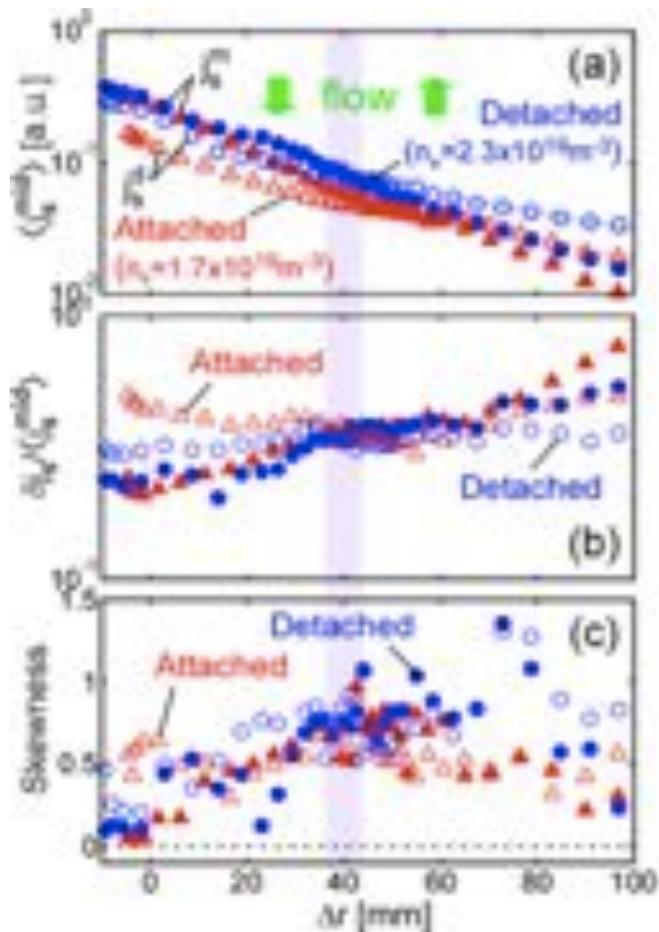
$$= \begin{cases} 1 \cdots v_a(t) \geq k \langle (j_s - \langle j_s \rangle)^2 \rangle \\ 0 \cdots \text{otherwise} \end{cases}$$

ノイズの影響を低減してスパイク波形を抽出

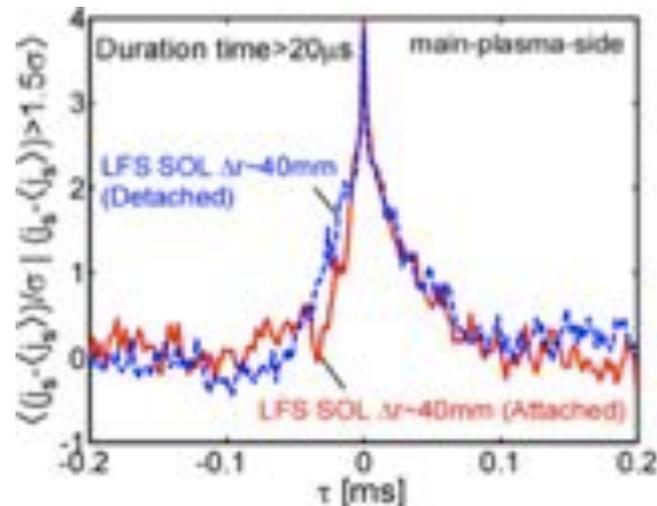
非接触ダイバータ状態時の弱磁場側SOL揺動解析

接触・非接触状態時の弱磁場側SOL中の揺動特性を比較

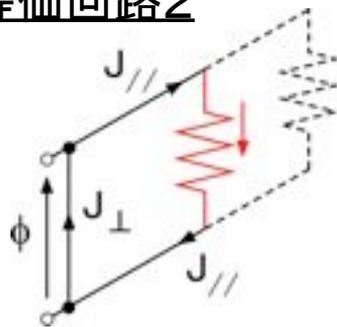
各種統計量の径方向分布



条件付き平均波形



等価回路2



接触・非接触状態時に明瞭な違いは見られない

輸送特性はダイバータ状態にあまり影響を受けない

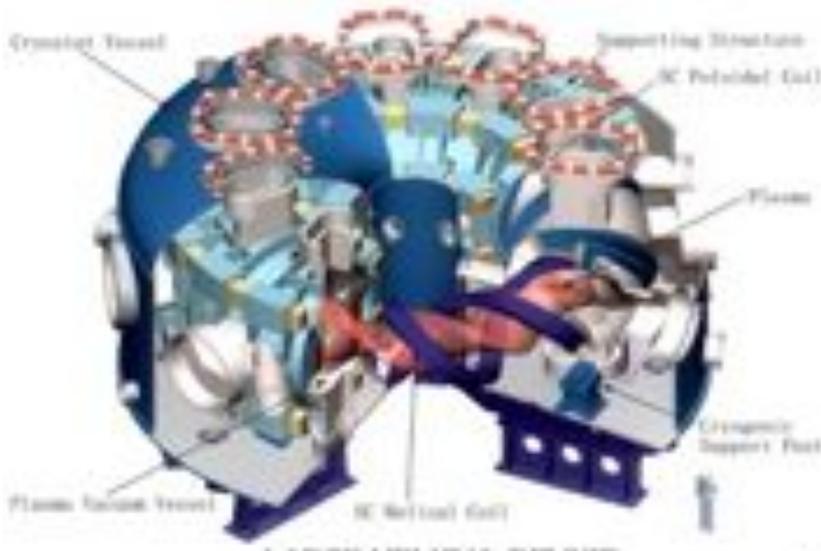
弱磁場側SOL中で発生するPlasma Blobの等価回路

⋮

保持抵抗はダイバータ上流位置の可能性大

LHDにおける境界プラズマ揺動解析

LHD概観図



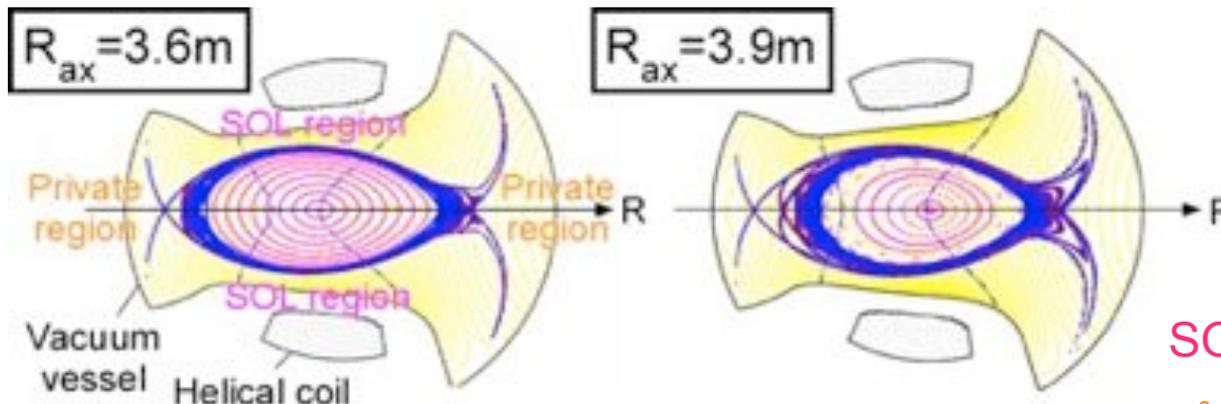
LHDの磁場構造

- ・2対のヘリカルコイルにより主に決定
- ・トロイダル方向に非対称
- ・磁気軸 R_{ax} により磁気面形状が変化



静電揺動信号解析＋真空磁場
計算コードKMAGを用いた磁場
構造解析を実施

ポロイダル断面における磁気面形状



2つの放電を解析対象

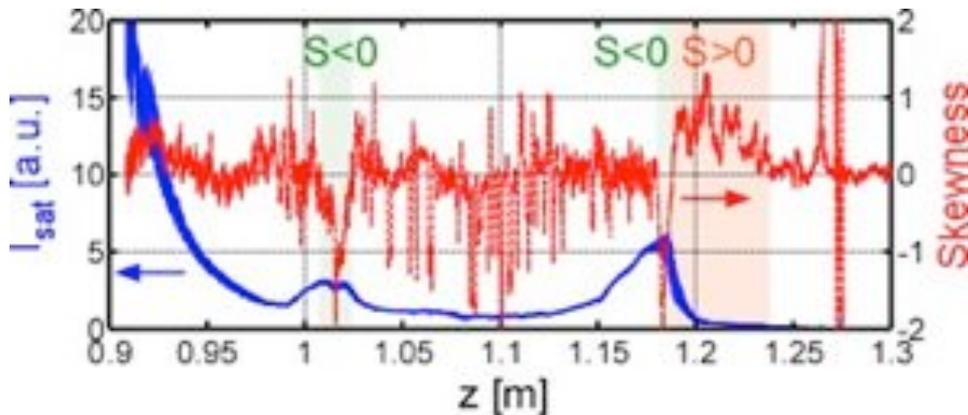
- ・#76557 ($R_{ax}=3.6\text{m}$)
- ・#72428 ($R_{ax}=3.9\text{m}$)

SOL領域: 磁場B大

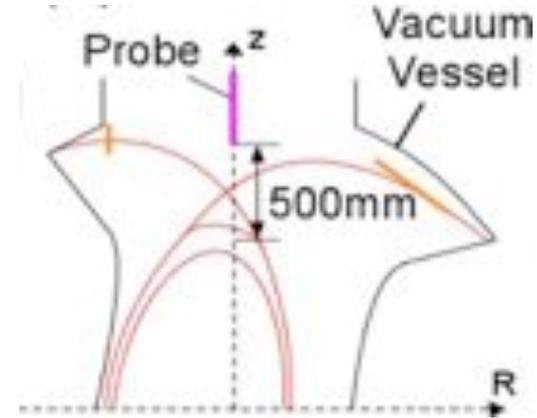
プライベート領域: 磁場B小

掃引プローブ計測信号解析 ($R_{ax}=3.6m$)

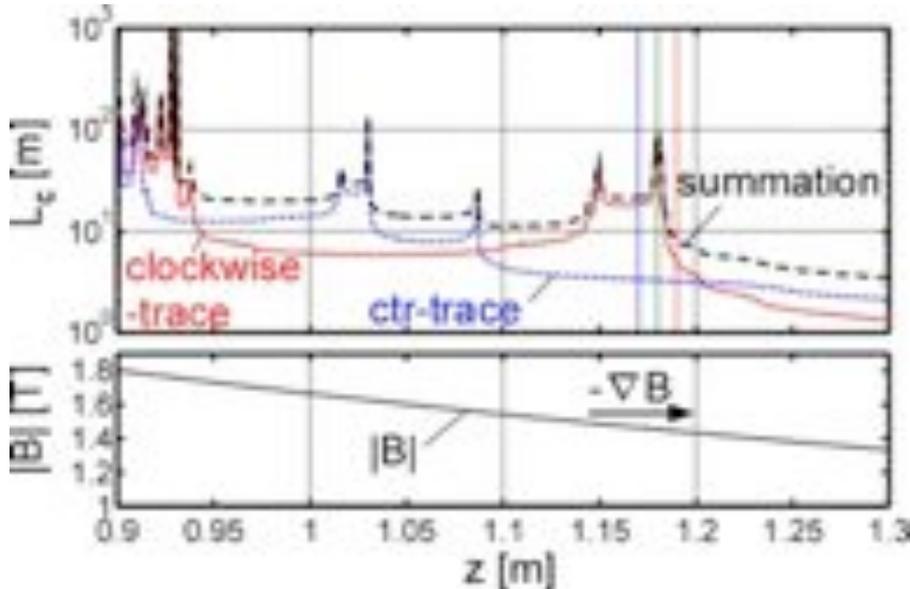
イオン飽和電流およびSkewnessのz方向分布



掃引プローブ配置



磁力線接続長および磁場強度のz方向分布



掃引プローブ計測信号の解析

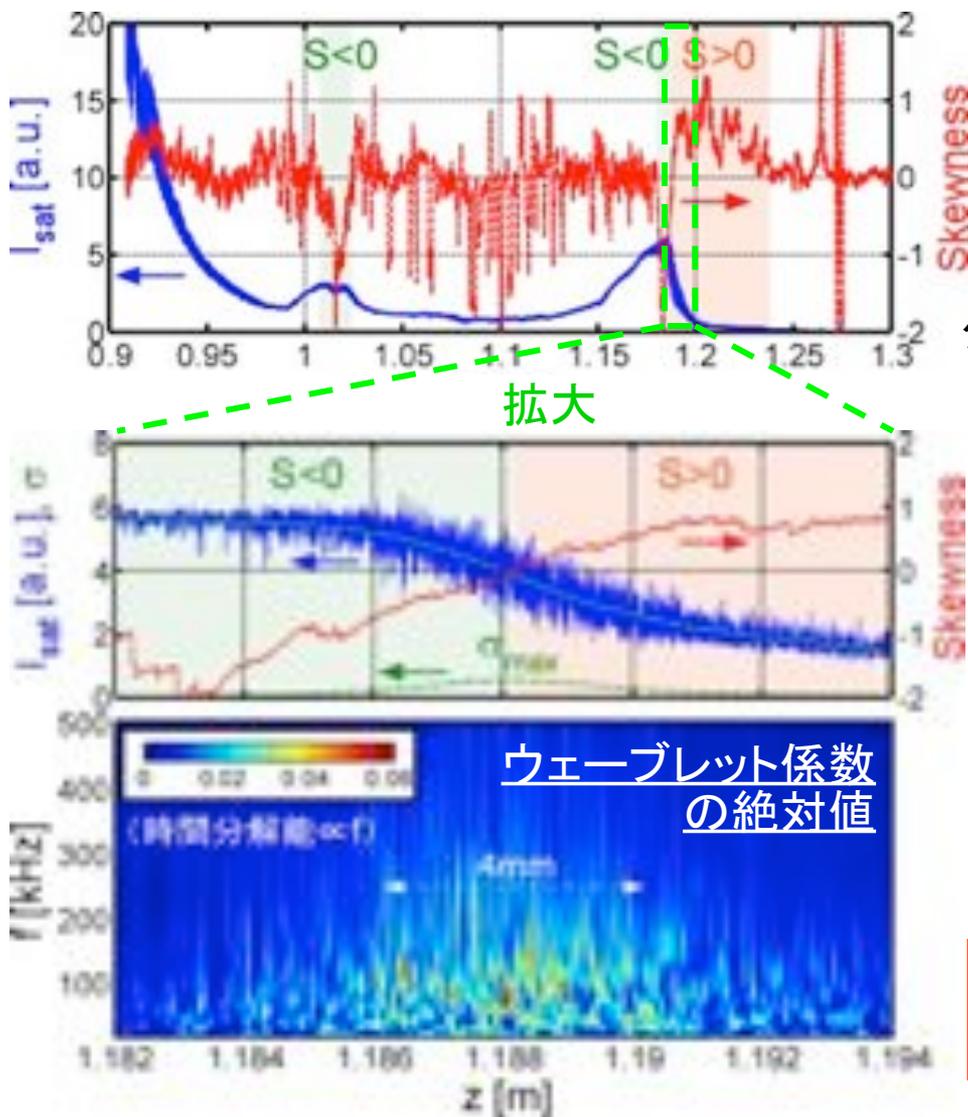
- ・ダイバータレッグ位置でSkewness < 0
- ・プライベート領域側でSkewness > 0



Plasma Blob検出時の特徴

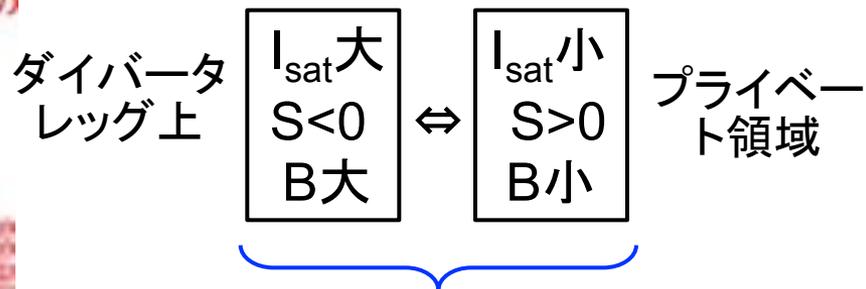
LHDにおけるPlasma Blob発生位置

イオン飽和電流およびSkewnessのz方向分布



イオン飽和電流勾配最大位置で

- ・Skewnessの正負入れ替わり
- ・100kHz程度の周波数成分大



トカマク装置のPlasma Blob発生位置(炉心-弱磁場側SOL間)の諸特性と一致

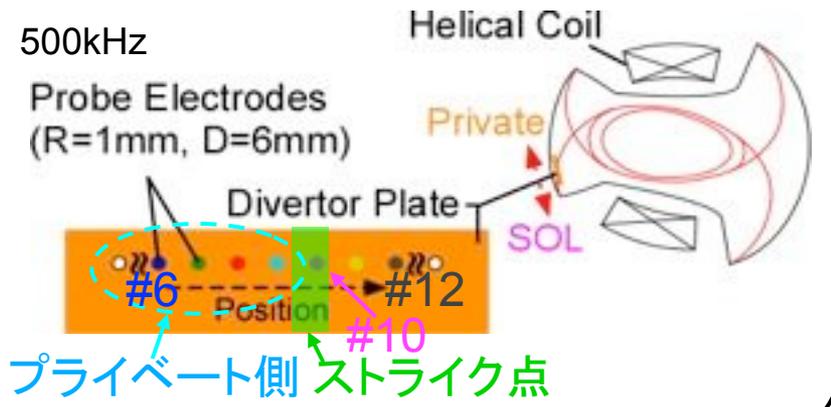
G.S. Xu *et al.*, Nucl. Fusion
49 (2009) 092002.



ダイバータレッグのプライベート領域側側面がPlasma Blob発生位置

非接触ダイバータ状態における解析 ($R_{ax}=3.9m$)

ダイバータプローブアレイ配置

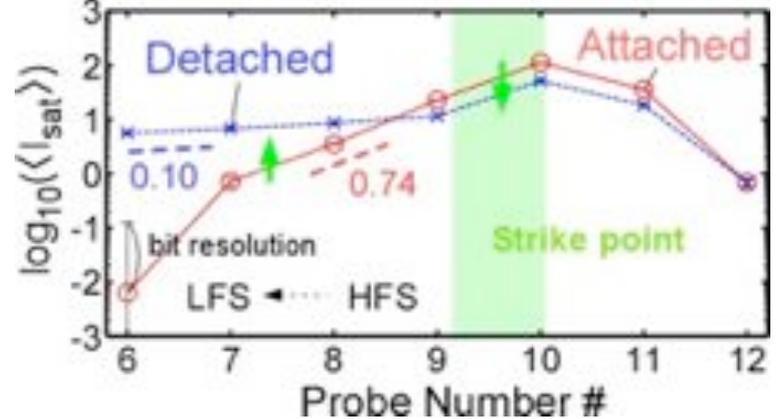


接触・非接触ダイバータ状態の比較

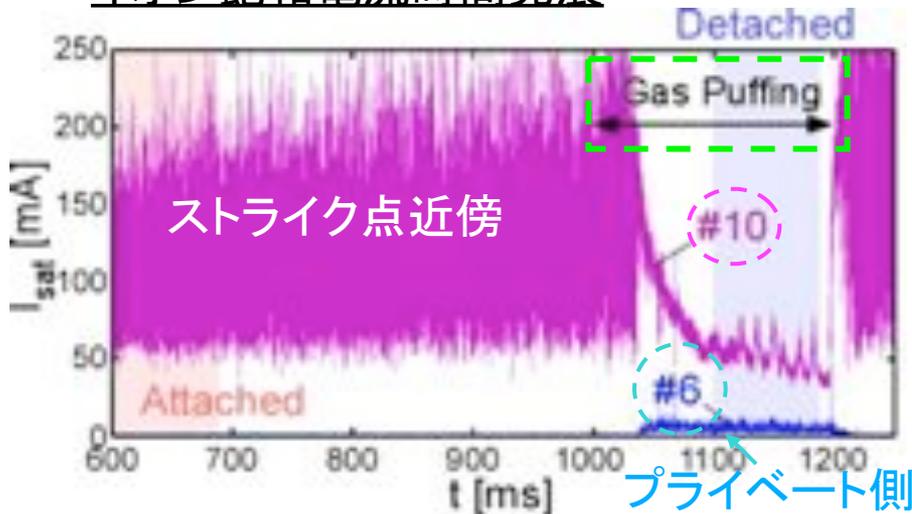
放電途中の大流量ガスパフ

⇒ 非接触ダイバータ状態

平均値分布 (片対数表示)



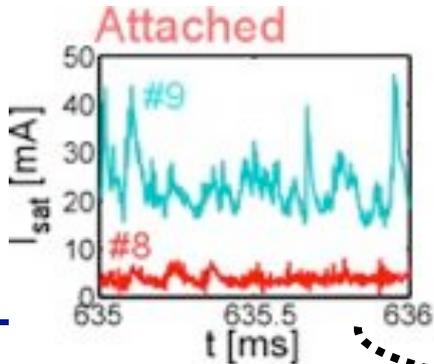
イオン飽和電流時間発展



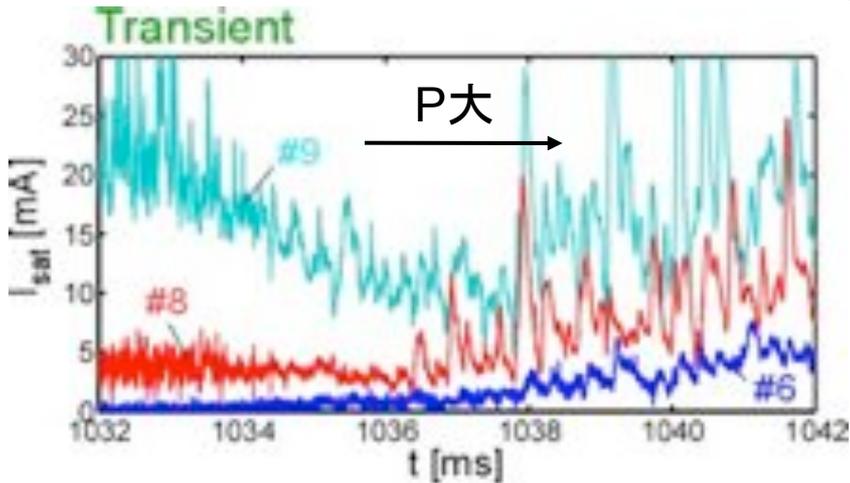
- ・ストライク点付近 (#9-11) でイオン飽和電流減少
- ・プライベート側位置 (#6-8) でイオン飽和電流増加

ダイバータプラズマ揺動特性の変化

イオン飽和電流時間発展の拡大図

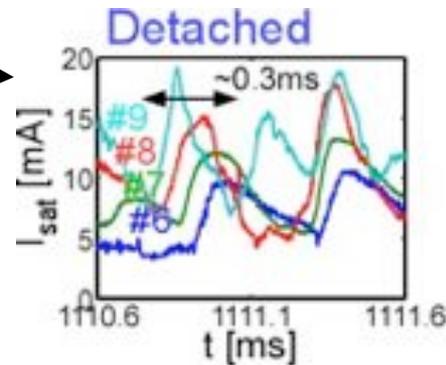


接触状態時・・・ストライク点横のプライベート側に位置するプローブ(#9)でPlasma Blob通過波形と似た正スパイク



接触から非接触状態への変化時・・・プライベート側プローブ(#6-8)でスパイク揺動振幅増加と平均値増加

P大



非接触状態時・・・ピークのずれた類似した正スパイク波形(≠Plasma Blob典型波形)を多数観測

相互相関解析



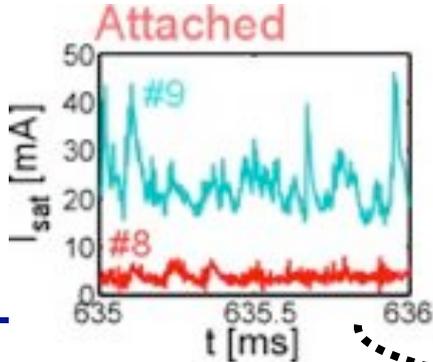
#9 → #8 → #7 → #6
プライベート側への対流的な伝播



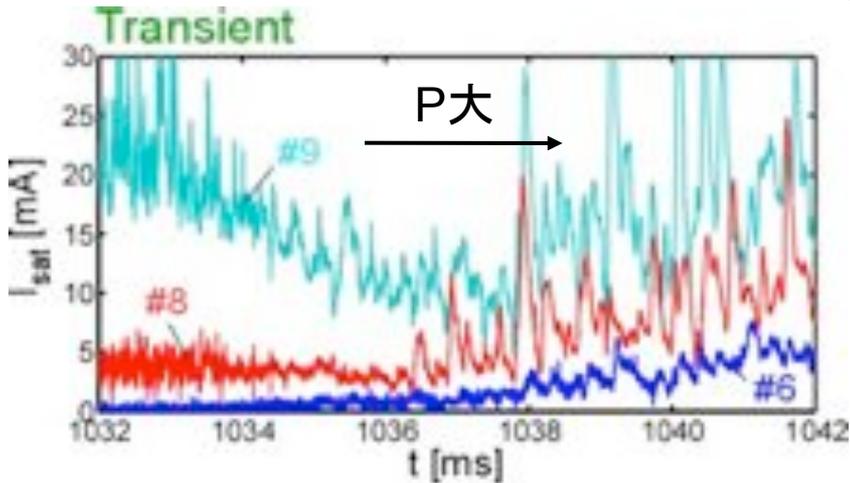
非接触状態時にPlasma Blob様の構造がより遠くまで輸送され平均値分布を広域化

ダイバータプラズマ揺動特性の変化

イオン飽和電流時間発展の拡大図

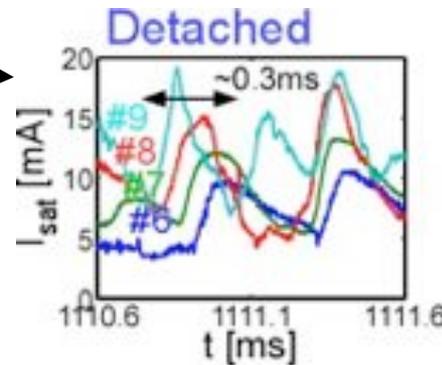


接触状態時・・・ストライク点横のプライベート側に位置するプローブ(#9)でPlasma Blob通過波形と似た正スパイク

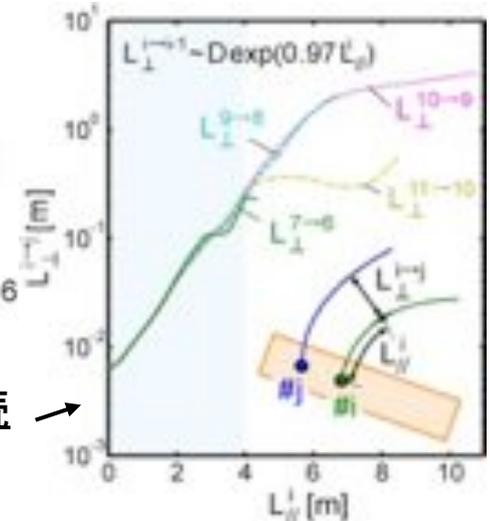


接触から非接触状態への変化時
・・・プライベート側プローブ(#6-8)でスパイク揺動振幅増加と平均値増加

P大



プローブ電極に接続する磁力線間距離

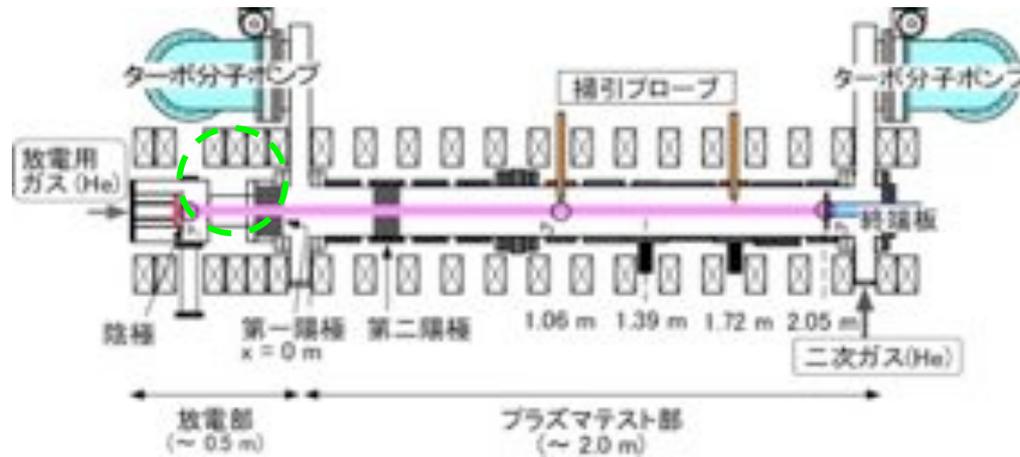


磁力線間距離はダイバータ板から離れるにつれ指数的に増加

ダイバータ板周辺位置で輸送発生

NAGDIS-IIにおける周辺プラズマ揺動解析

直線型ダイバータ模擬試験装置NAGDIS-II



第5章の主目的
磁場と直交する2次元断面
内における輸送挙動の解明
および評価法の確立

各計測法の特徴

○静電プローブ

計測範囲:	点計測
時間分解能:	高
振幅分解能:	高
空間分解能:	高
擾乱:	小~大(本数に依存)
設置条件:	導入棒のみ

○高速カメラ

計測範囲:	面計測
時間分解能:	中
振幅分解能:	低
空間分解能:	線積分
擾乱:	無
設置条件:	視線確保が必要

高速カメラを用いた2次元輸送挙動解析

評価方法①

・接触ダイバータ状態

・非接触ダイバータ状態
終端板への熱負荷低減

現象のクロスチェック

↑ 終端に視線確保

・静電プローブ

・高速カメラ

⇒ 経験的固有直交展開法によるモード解析

NAGDIS-II終端

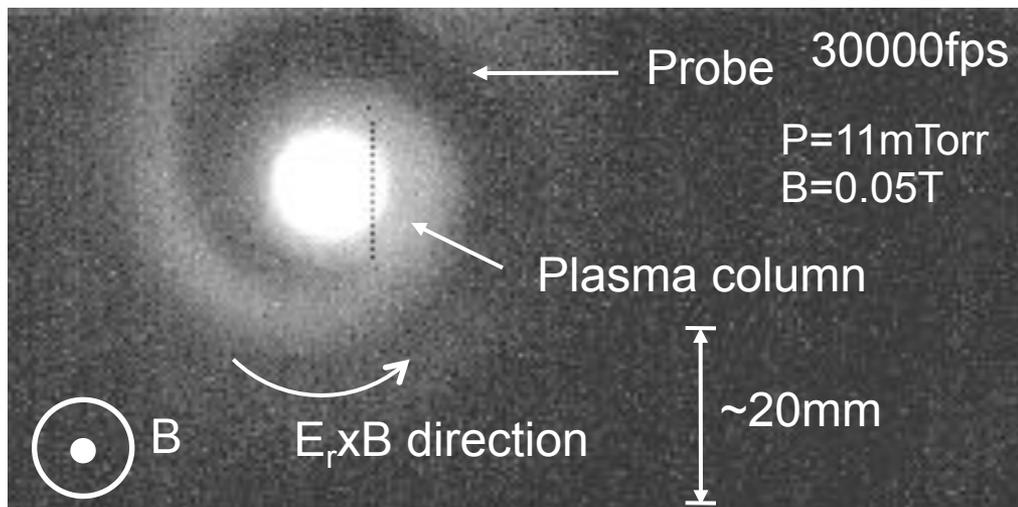


非接触プラズマ中のプラズマ発光の動的挙動

非接触ダイバータ環境下での磁場直交面の高速カメラ計測

計測結果の一例

128x256pixel (~54x108mm²)



渦状のプラズマ発光の回転を初めて観測

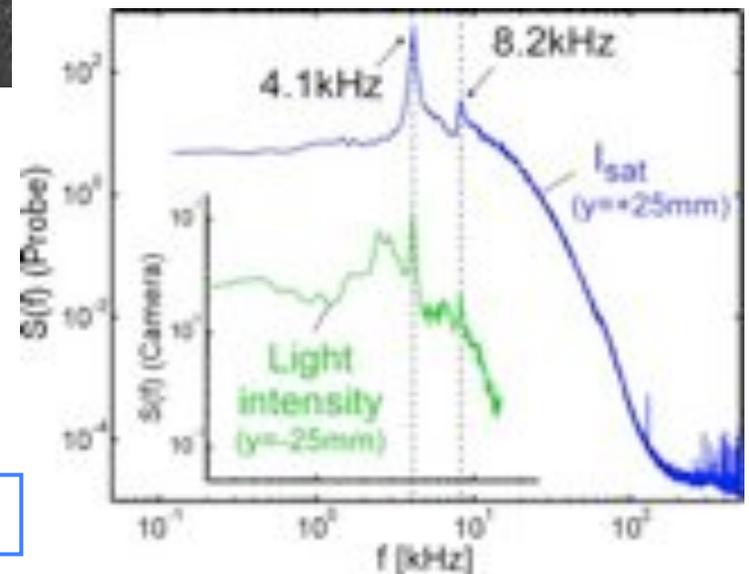
回転方向: $E_r \times B$ ドリフト方向

プローブおよび高速カメラ計測信号のパワースペクトル ($B=50\text{mT}$)

側面図



焦点面内におけるプラズマ揺動を反映



経験的固有直交展開法によるモード解析

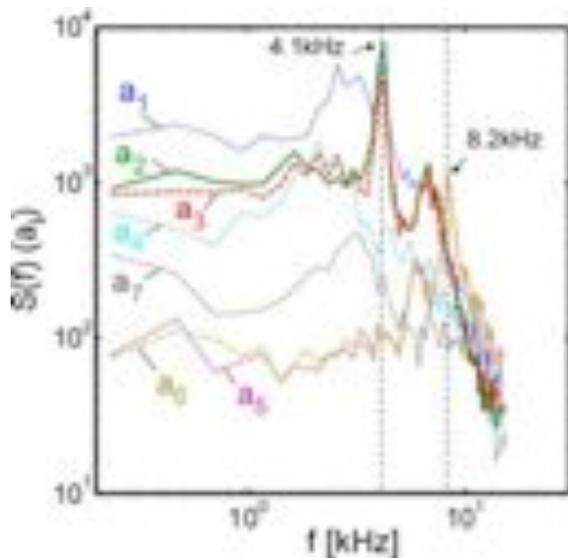
f=4.1kHz, 8.2kHzの周波数成分が寄与する空間構造の抽出

動画データへの経験的固有直交展開法の新規適用

$$\begin{aligned} \tilde{I}(x, t) &= a_1(t)\phi_1(x) + a_2(t)\phi_2(x) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^n a_i(t)\phi_i(x) \end{aligned}$$

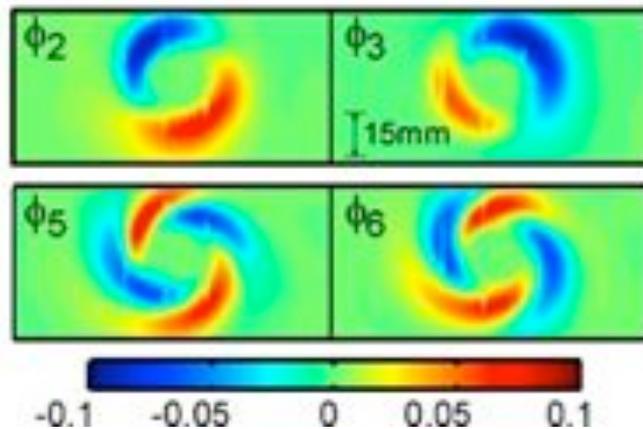
$C\phi_i = \lambda_i\phi_i$, C : 共分散行列

時間の基底の
パワースペクトル



モード数 m=1, 2 の不安定性から放出されたと見られる構造がピークを形成

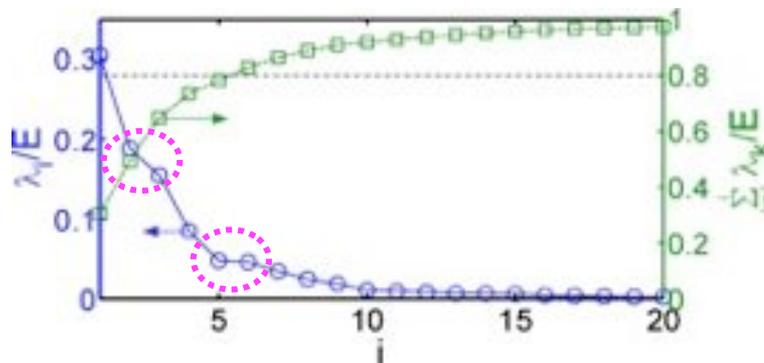
空間の基底



f=4.1kHz
モード数 m=1

f=8.2kHz
モード数 m=2

各基底の分散への寄与率



$$\begin{aligned} E &= \sum_{k=1}^n \langle \tilde{I}^2(x_k, t) \rangle \\ &= \sum_{i=1}^n \langle a_i^2 \rangle = \sum_{i=1}^n \lambda_i \end{aligned}$$

2本の静電プローブを用いた2次元輸送挙動解析

評価方法②

・接触ダイバータ状態

・非接触ダイバータ状態

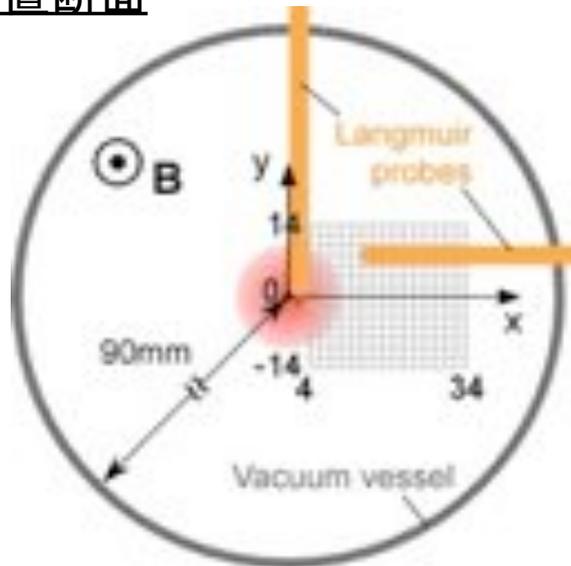
↑ 定常放電を利用

・静電プローブ(2本)

・高速カメラ

⇒三成分分解法+時空間相関解析法の適用

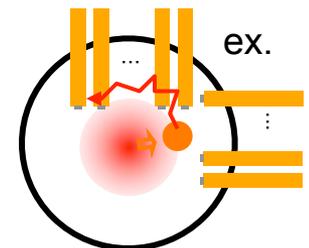
装置断面



{
プローブ(上): 参照信号取得用に固定
プローブ(横): 計測ごとにメッシュ上を移動

⇒2点同時計測のデータセットを
多数取得して解析

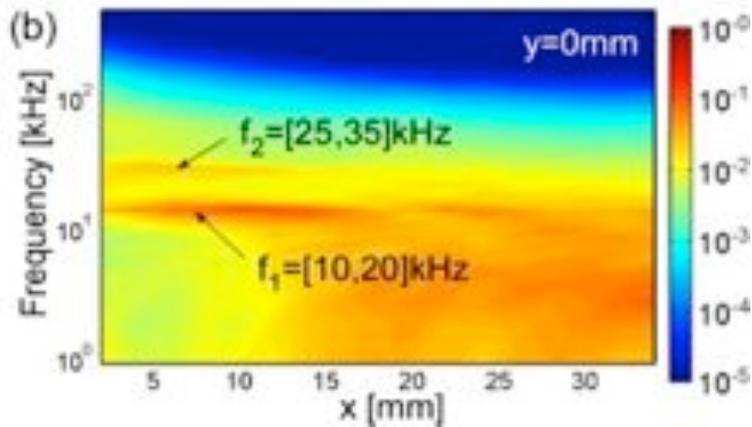
多点計測に比べ擾乱小



三成分分解法＋時空間相関解析法の適用

規格化パワースペクトル(y=0mm)

接触プラズマ中においてもダブルピーク



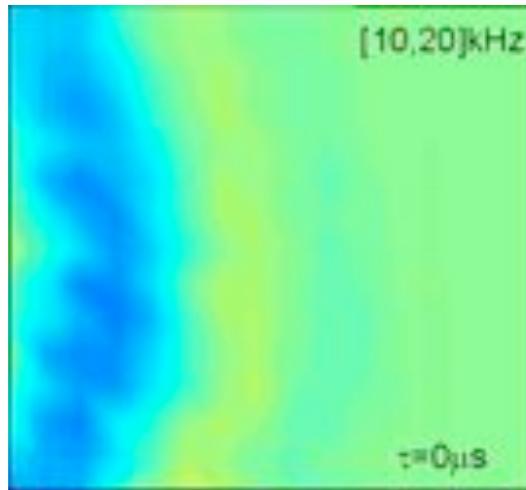
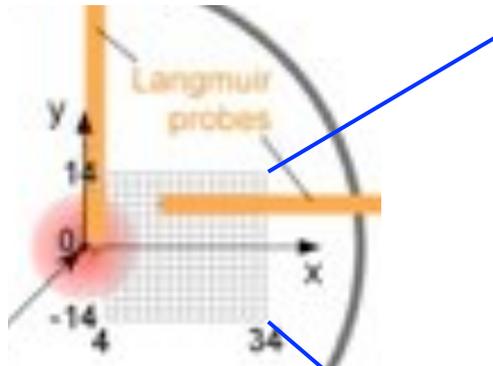
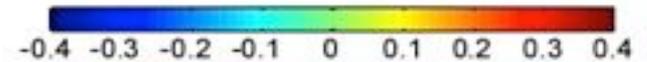
三成分分解法

$$I = \bar{I} + \tilde{I} = \bar{I} + I_f + I_b$$

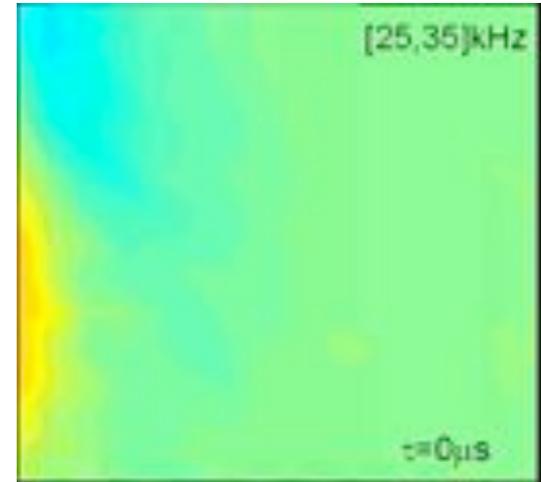
三成分分解法＋時空間相関解析法

$$C_{ij}^f(\tau) \equiv \langle I_f(x_i, t) \tilde{I}(x_j, t + \tau) \rangle$$

時空間相関関数



$f_1=[10,20]$ kHz

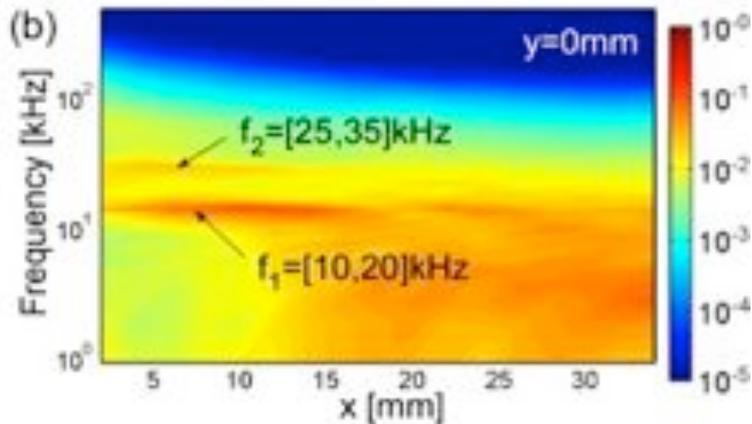


$f_2=[25,35]$ kHz

三成分分解法＋時空間相関解析法の適用

規格化パワースペクトル(y=0mm)

接触プラズマ中においてもダブルピーク



三成分分解法

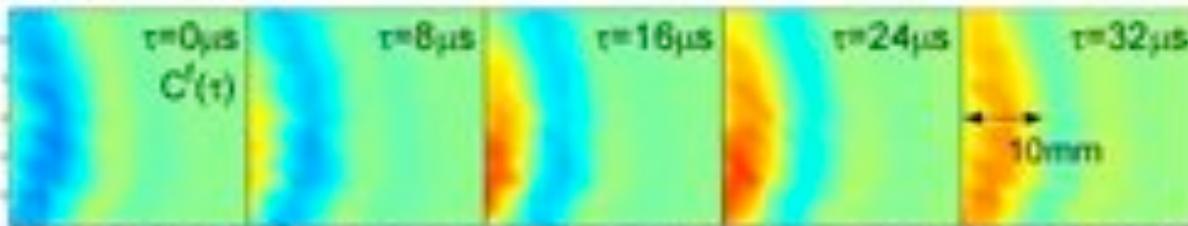
$$I = \bar{I} + \tilde{I} = \bar{I} + I_f + I_b$$

三成分分解法＋時空間相関解析法

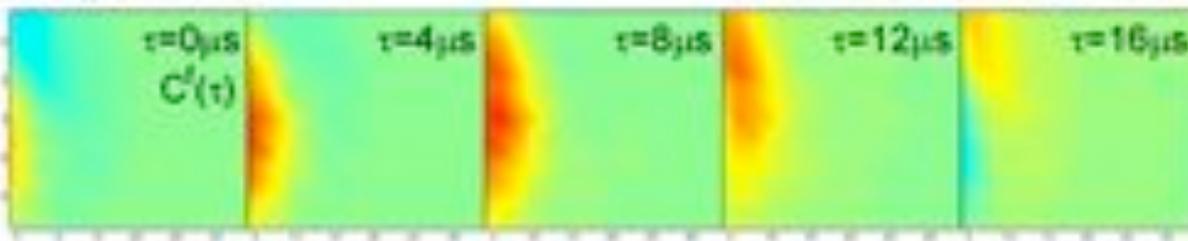
$$C_{ij}^f(\tau) \equiv \langle I_f(x_i, t) \tilde{I}(x_j, t + \tau) \rangle$$

時空間相関関数

(a) $f_1 = [10, 20]$ kHz



(b) $f_2 = [25, 35]$ kHz



2つの空間構造の2次元動的挙動を抽出

まとめ

- 境界プラズマでの燃料粒子，不純物粒子輸送制御，プラズマ対向壁への熱流制御は，定常高性能炉心プラズマ制御の基盤を与える。
- 非接触プラズマの物理的理解は著しく進んだが，実機への適用に関しては，非接触プラズマの長時間維持・制御研究は重要な課題
- Plasma Blobによる径方向輸送は，磁場閉じ込め方式に依存しない普遍的な現象である
- 非接触プラズマによるプラズマ熱流制御において，Plasma Blob輸送との関連が重要である

プラズマ対向壁への粒子・熱負荷制御と定常高性能炉心プラズマ維持の両立性の工学的実証が不可欠

プログラム公開ページ

MSFLAB/Freeze プログラム公開ページ

プログラムの説明

このページでは公開のソースに関する説明を行います。

- プログラムの概要
- プログラムの構成
- プログラムのインストール
- プログラムの実行
- プログラムの更新
- プログラムのライセンス

プログラムの概要

このプログラムは、MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。このプログラムは、MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。このプログラムは、MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。

- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。
- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。
- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。
- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。
- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。
- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。

プログラムの構成

このプログラムは、以下の構成で構成されています。

- MSFLAB/Freeze のソースコードを公開するためのページです。

プログラムパッケージ

2010/11/07時点

公開関数

fftfun: パワースペクトル
cftfun: クロススペクトル
corfun: 自己・相互相関関数
pdfun: 確率密度関数(PDF)
rpfun: PDF再構成パラメータ
kldfun: カルバックライブラーの
ダイバージェンス
condfun: 条件付き平均
wdfun: 待ち・持続時間分布
podfun: 経験的固有直交展開
svdfun: 特異値分解
stcfun: 構造関数
cohfun: コヒーレンス
bcfun: バイコヒーレンス
cwtfun: 連続ウェーブレット変換
icwtfun: 連続逆ウェーブレット変換
fluctuation: 揺動成分
normalize: 無次元化
fluctlevel: 揺動レベル
skewness: Skewness
flatness: Flatness

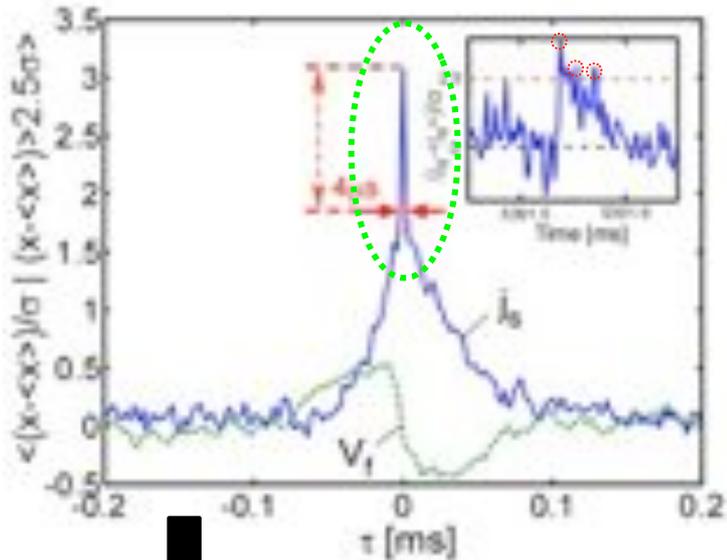
gaussian: ガウス関数
gaussmulti: 多変量ガウス関数
hermite: エルミート多項式
poisson: ポワソン分布
fbm: 非整数ブラウン運動
proc: 多項式フィッティング差分
fftfil: FFTフィルタ
fftfil: FFTフィルタ(平滑)
ensemble: 関数出力の平均①
ensemble2: 関数出力の平均②
multiin: 多次元データ入出力
dif: FFT微分
overth: 閾値検出
moment: 移動モーメント
sliceget: 配列スライス
gnfit: フィッティング
funcpack: フィッティング関数
fitting: フィッティング簡易
surf2: 2次元SURFプロット
signdigit: 桁丸め
polarget: 円弧極座標抽出
detectline: 行番号検索
startup: サーチパス指定

未公開関数

rawwread: バイナリ(raww)読込
wvfreed: バイナリ(wvf)読込
avicg: 動画粗視化
polarrotate: 動画回転
guiprobe: GUIプローブ解析

ノイズ含有信号からの正スパイク波形抽出

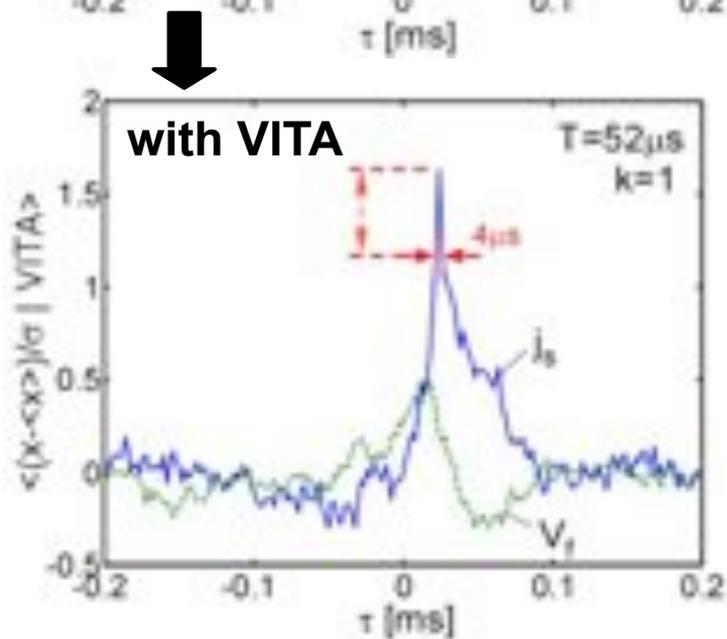
条件付き平均波形



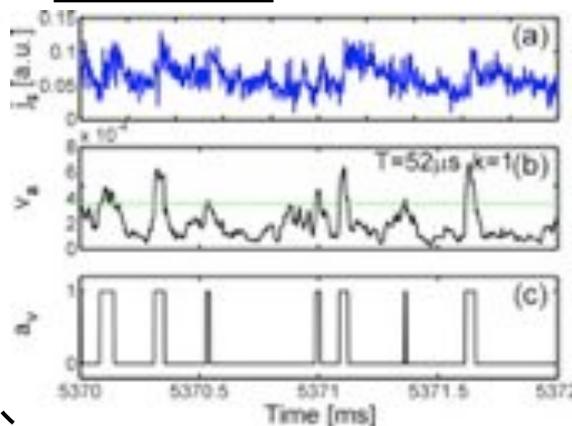
条件付き平均法・・・閾値などを基準として波形を検出、平均化して典型的なスパイク形状を得る

回路内ノイズ(DD反応中性子に起因)

↓ (ローパスフィルタの使用は控えたい)



VITA法



局所平均

$$\langle j_s \rangle_s(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} j_s(t') dt'$$

局所分散

$$v_a = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (j_s(t') - \langle j_s \rangle_s(t))^2 dt'$$

$$a_v(t)$$

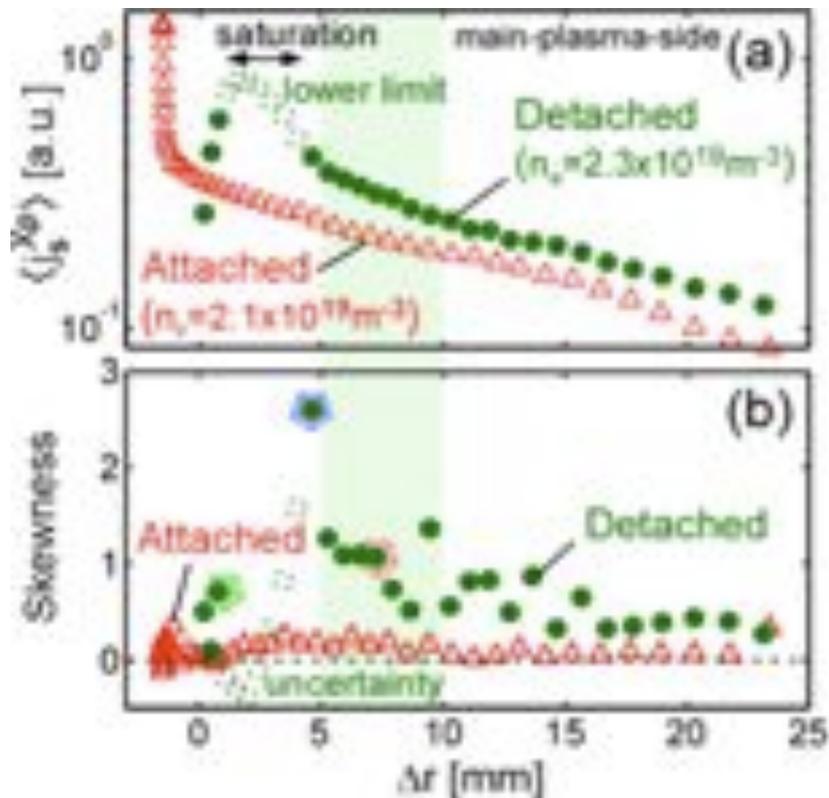
$$= \begin{cases} 1 \cdots v_a(t) \geq k \langle (j_s - \langle j_s \rangle)^2 \rangle \\ 0 \cdots \text{otherwise} \end{cases}$$

Plasma Blob研究で初めてVITA法を適用しノイズの影響を低減、スパイク波形を抽出

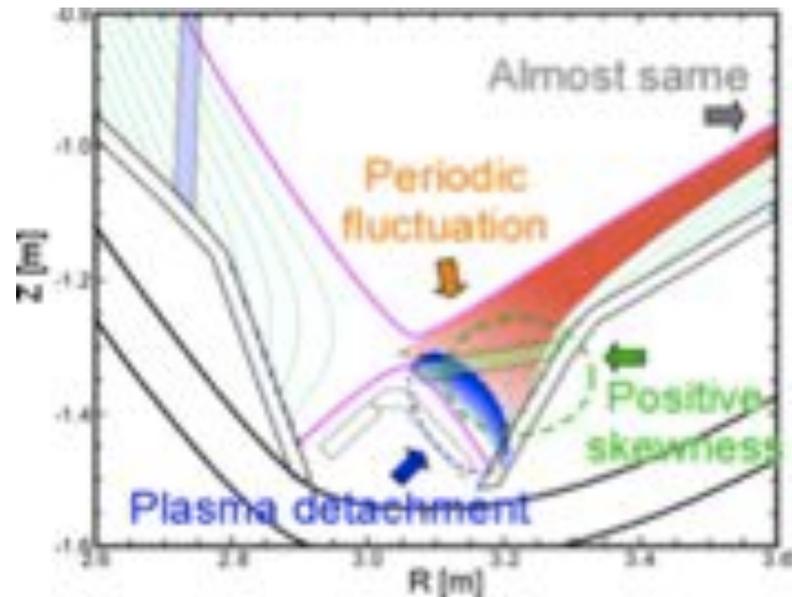
非接触状態時のダイバータプラズマ揺動解析

接触・非接触状態時のダイバータプラズマ中の揺動特性を比較

接触・非接触状態時のX点周辺での
 平均値、Skewnessの径方向分布



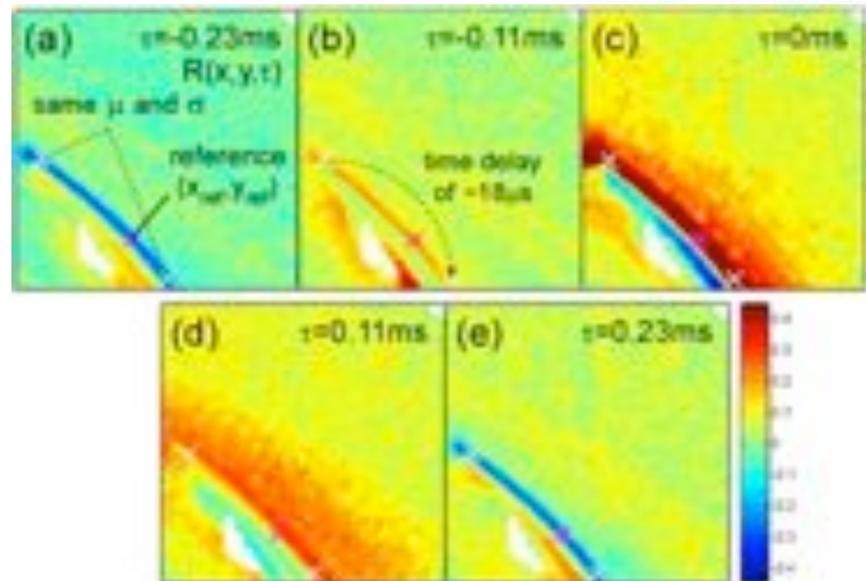
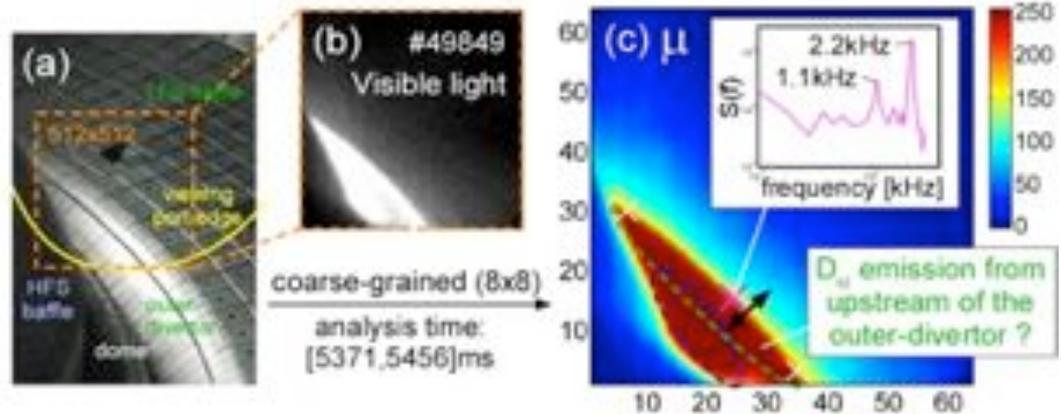
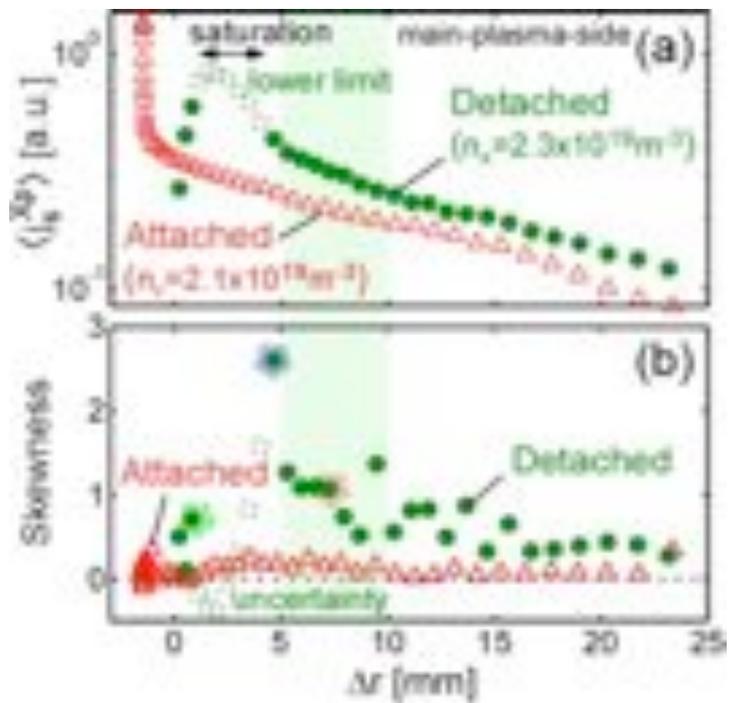
非接触ダイバータ周辺の解析結果の模式図



非接触状態時のみ
 ・ダイバータレッグ近傍で周期変動
 ・周期変動位置より弱磁場側で**正に**
 スパイク的な波形を観測



ダイバータ領域内での非拡散的
 輸送の発生を示唆



JETにおけるPlasma Blob発生に関する報告

“Blob/hole formation and zonal-flow generation in the edge plasma of the JET tokamak”

G.S. Xu *et al.*, Nucl. Fusion **49** (2009) 092002.

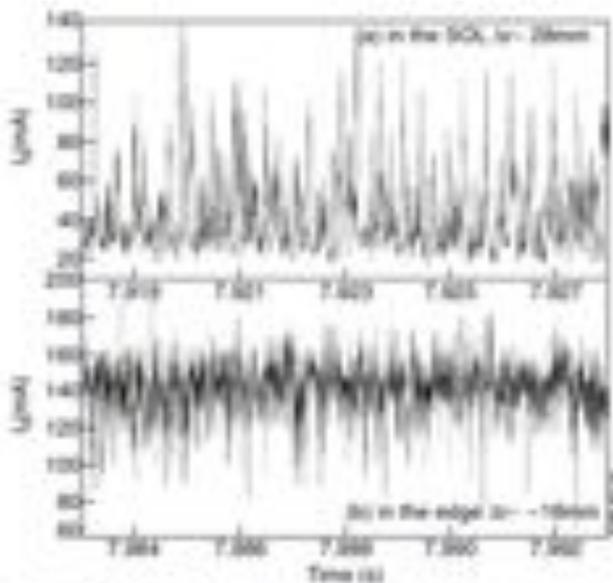


Figure 1. Raw signals of ion saturation current I_s : (a) intermittent positive pulses are prevailing in the SOL, $\Delta t = 28$ ms and (b) intermittent negative pulses are prevailing in the edge $\Delta t = 18$ ms.

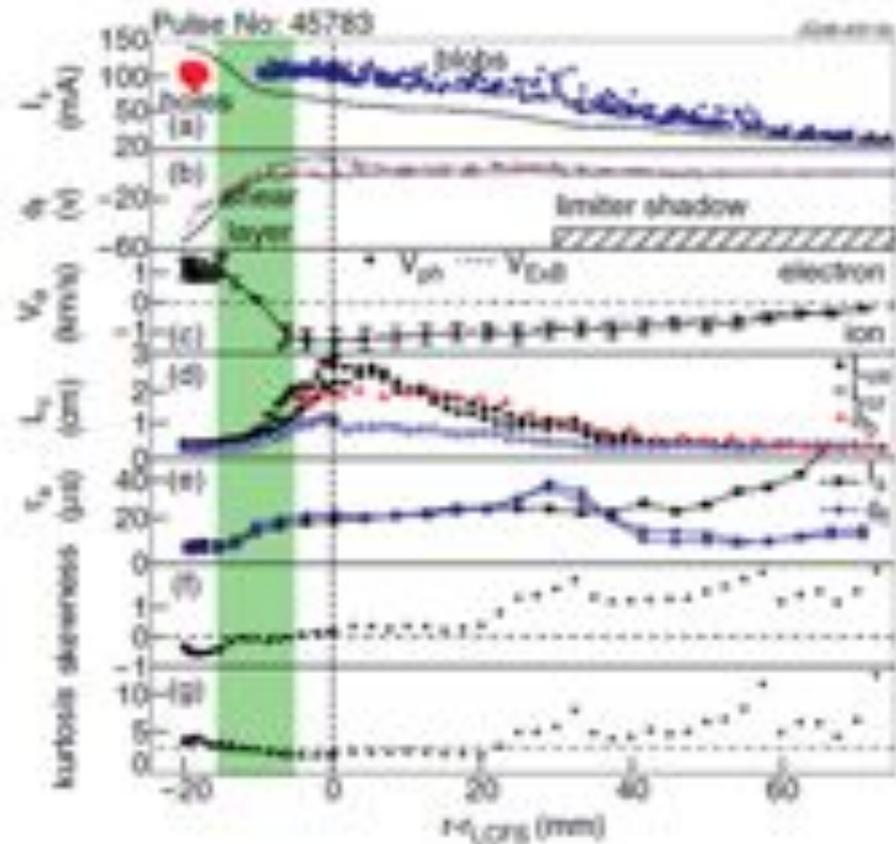
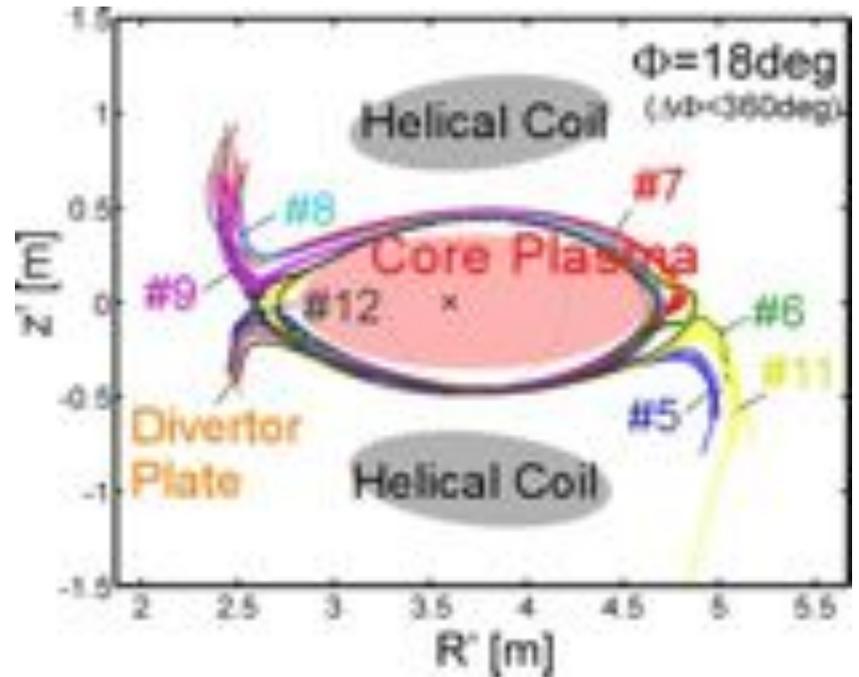
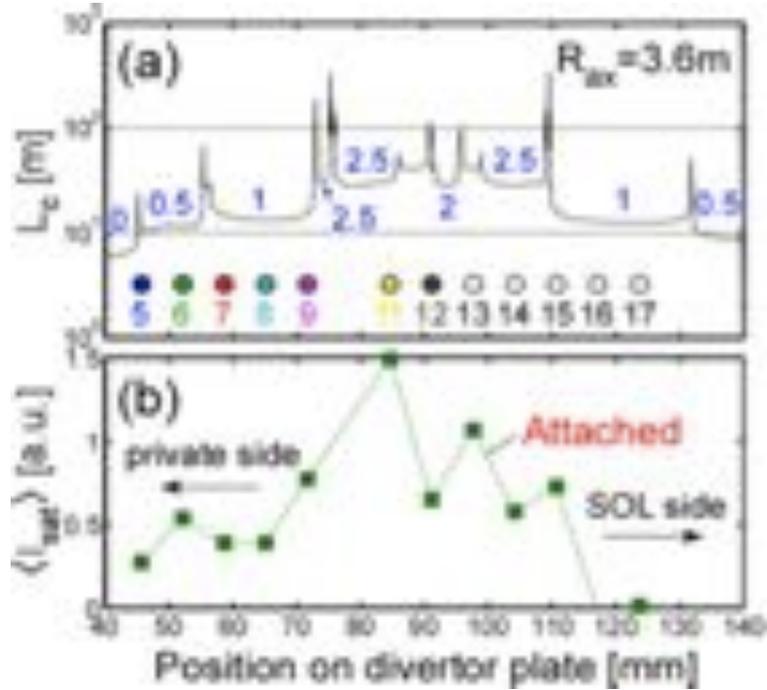


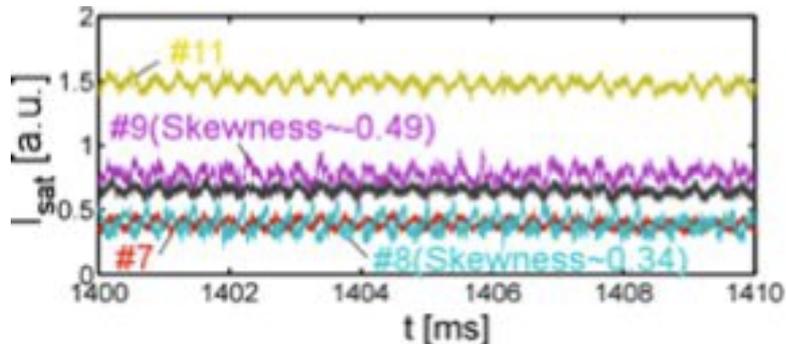
Figure 3. The radial profiles of (a) ion saturation current I_s , blobs (points), holes (triangles); (b) floating potentials ϕ_f of six tips; (c) poloidal phase velocity V_{ϕ} of fluctuations and background $E \times B$ drift velocity $V_{E \times B}$; (d) poloidal L_{\perp} and radial L_{\parallel} correlation length and average blob size δ_b ; (e) autocorrelation times of I_s and ϕ_f ; (f) skewness and (g) kurtosis of I_s . (Colour online.)

LHDのSOL中の揺動特性



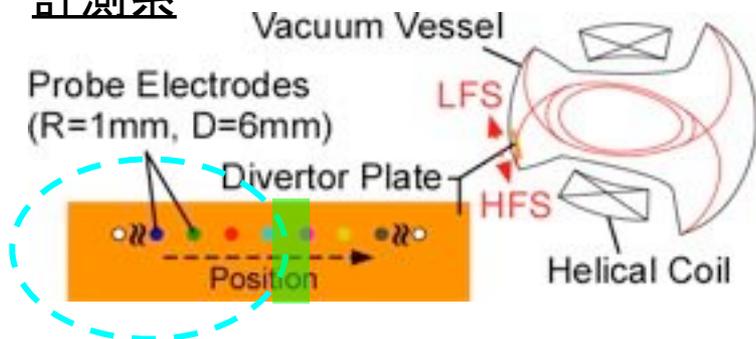
SOLに接続するダイバートプローブ

~2.8kHzの周期変動



ダイバータ板上流の磁力線追跡

計測系



ここまでの議論・・・ダイバータ板上のみ

非接触時のプライベート側プローブ(#6-9)

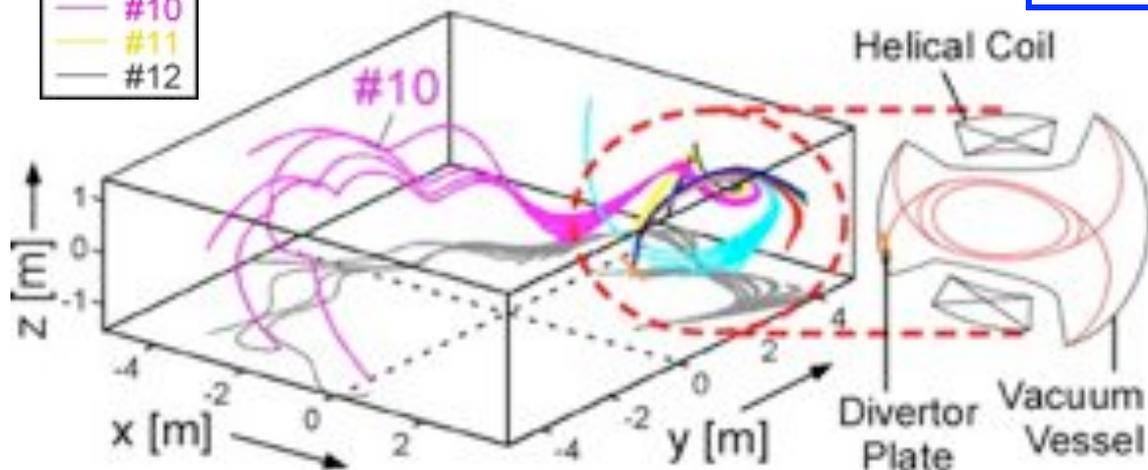
- 正にスパイク的な成分が増大
- スパイク成分増大に伴い平均値増加
- 揺動はプライベート方向へ伝播

⇒ 非接触状態時に非拡散的輸送増大

→ 輸送発生領域を同定するために
ダイバータ上流の情報外挿が不可欠



ダイバータプローブに接続する 磁力線の3次元構造



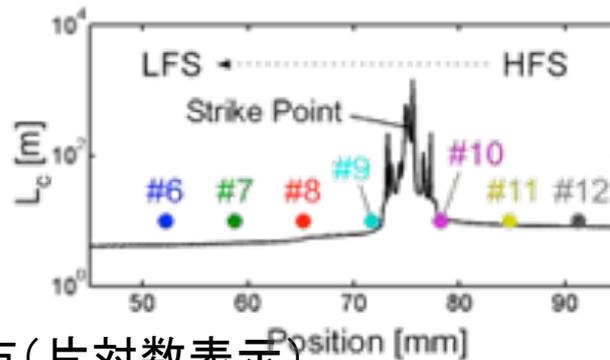
真空磁場計算コードKMAG
を用いた磁力線追跡・解析

⇒ プローブアレイ位置
への焼きなおし

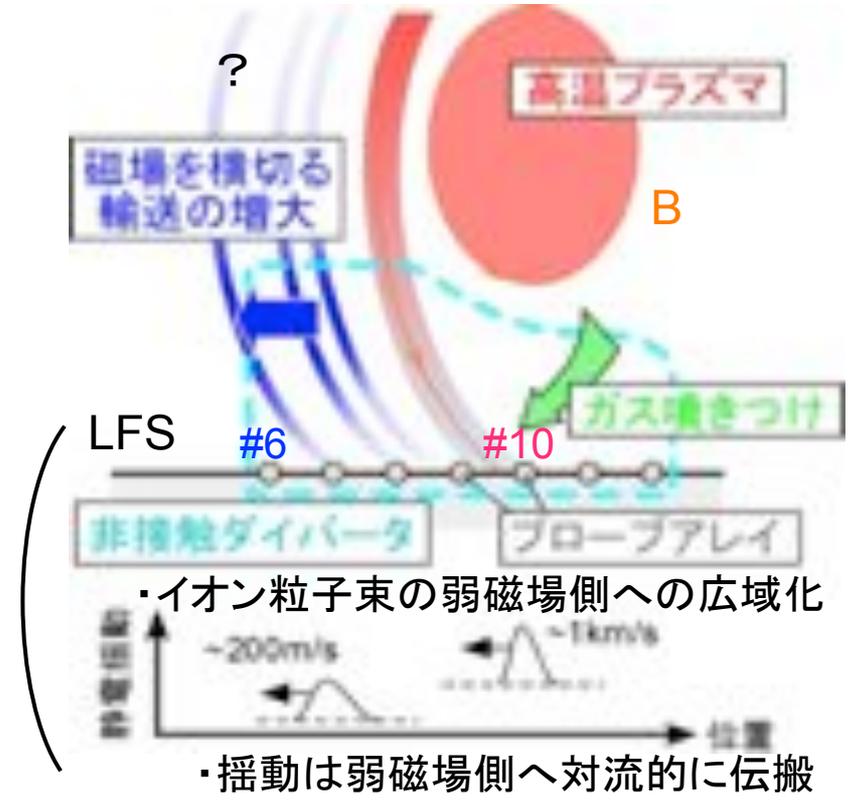
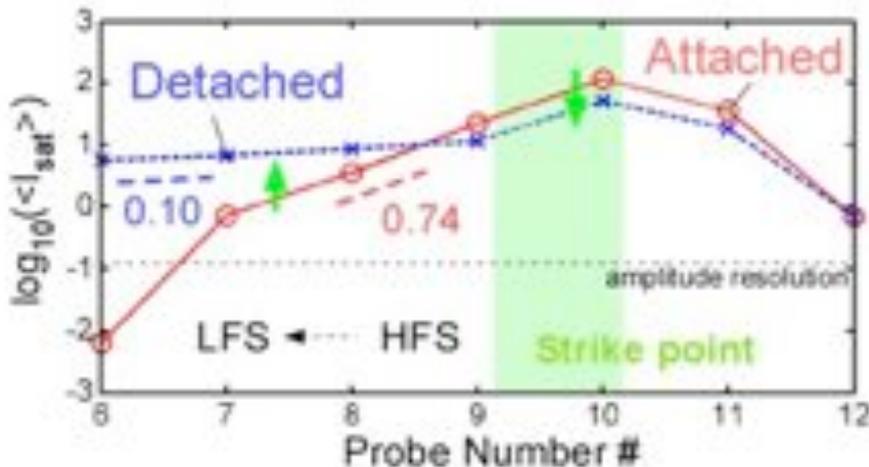
大型ヘリカル装置LHDにおける揺動解析

Shot number : 72428
 Rax : 3.9m
 Bt : 2.53T
 g : 1.25
 Bq : 100%
 Gas : He, H

プローブ位置と磁力線
 接続長分布



平均値分布 (片対数表示)



非接触状態のときPlasma Blob輸送に類似した非拡散的輸送が増大

↑
 輸送発生位置はダイバータ板上流

KMAGコードを用いた磁場構造解析

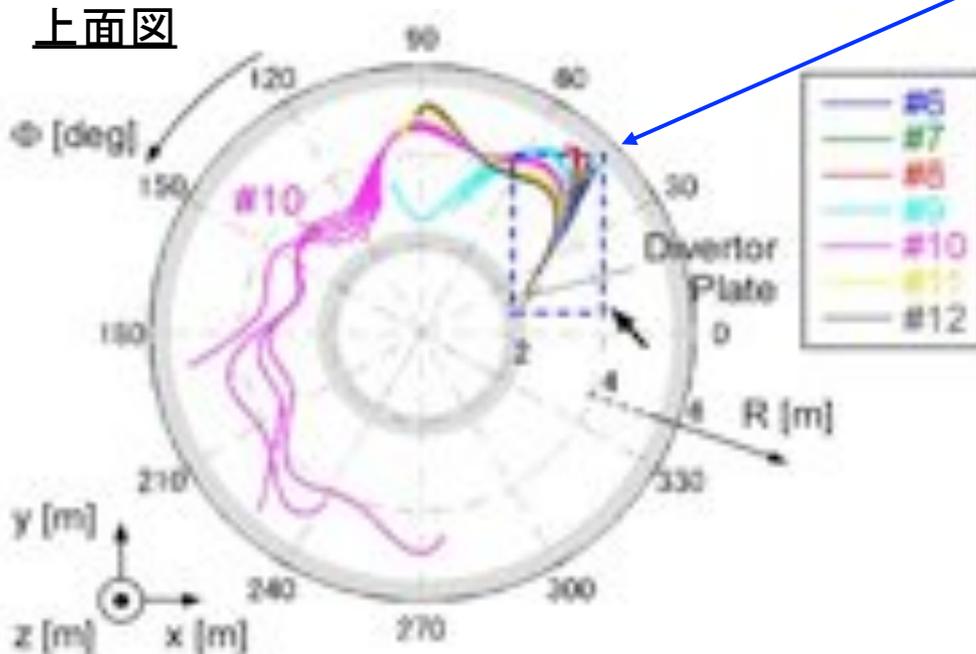
プローブ電極から磁力線を追跡して
ダイバータ板上流の情報を外挿

KMAGコード: 真空磁場計算コード

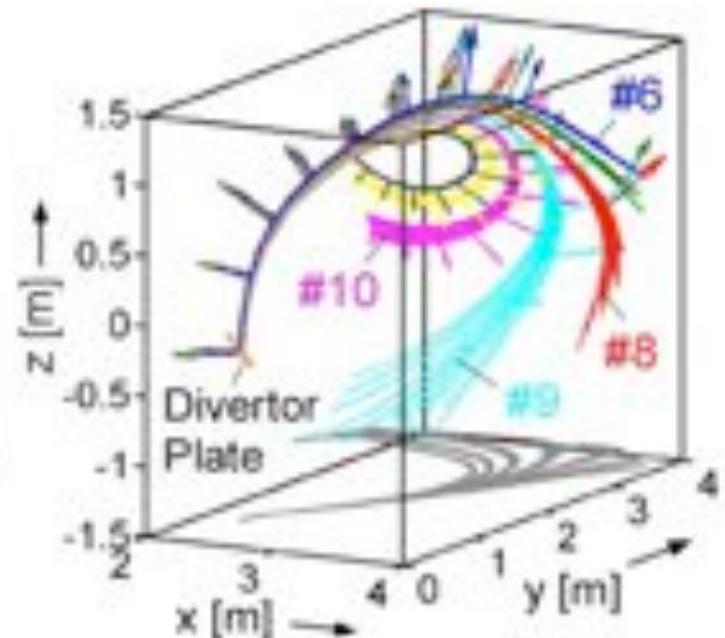
弱磁場側プローブ(#6-8)に接
続する磁力線はこの領域の
みでしか隣接しない

⇒ 輸送発生領域の特定

鳥瞰図



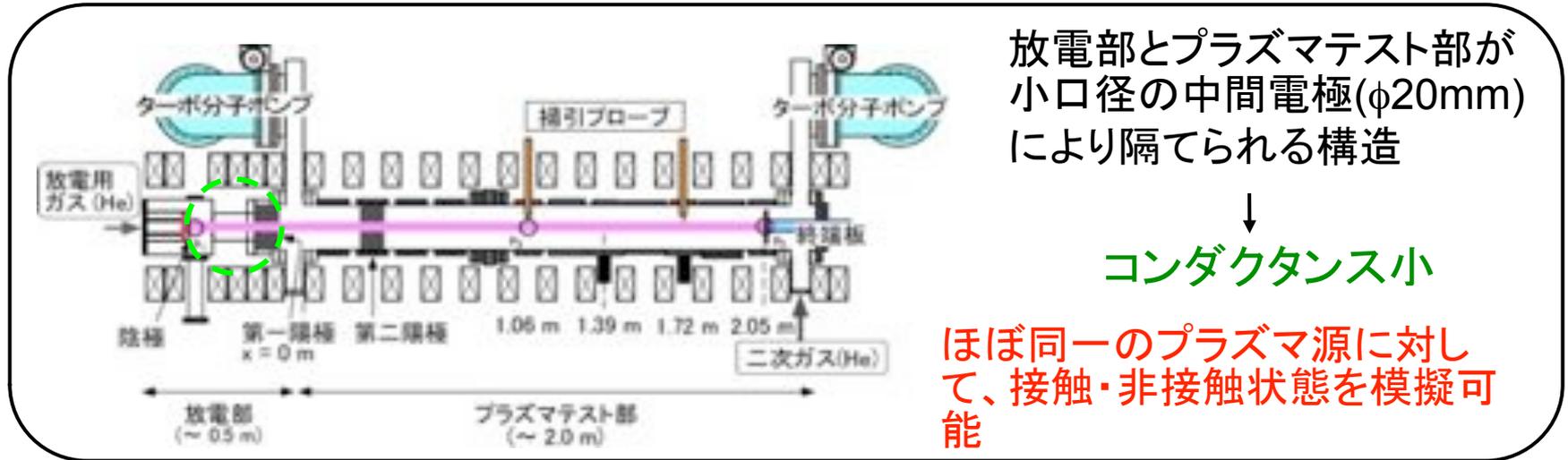
図中矢印: Plasma Blob輸送理論に
より予測される輸送方向



非接触時に増大した揺動伝搬方向は
Plasma Blob輸送理論と同方向

NAGDIS-IIにおける周辺プラズマ揺動解析

直線型ダイバータ模擬試験装置NAGDIS-II



第5章の主目的

磁場と直交する2次元断面内における輸送挙動の解明および評価法の確立

計測系 ○静電プローブ

計測範囲:	点計測
時間分解能:	高
振幅分解能:	高
空間分解能:	高
擾乱:	小～大(本数に依存)
設置条件:	導入棒のみ

○高速カメラ

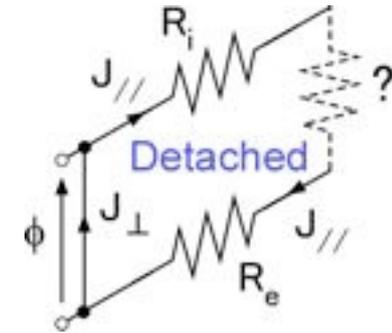
計測範囲:	面計測
時間分解能:	中
振幅分解能:	低
空間分解能:	線積分
擾乱:	無
設置条件:	視線確保が必要

NAGDIS-IIにおける周辺プラズマ揺動解析

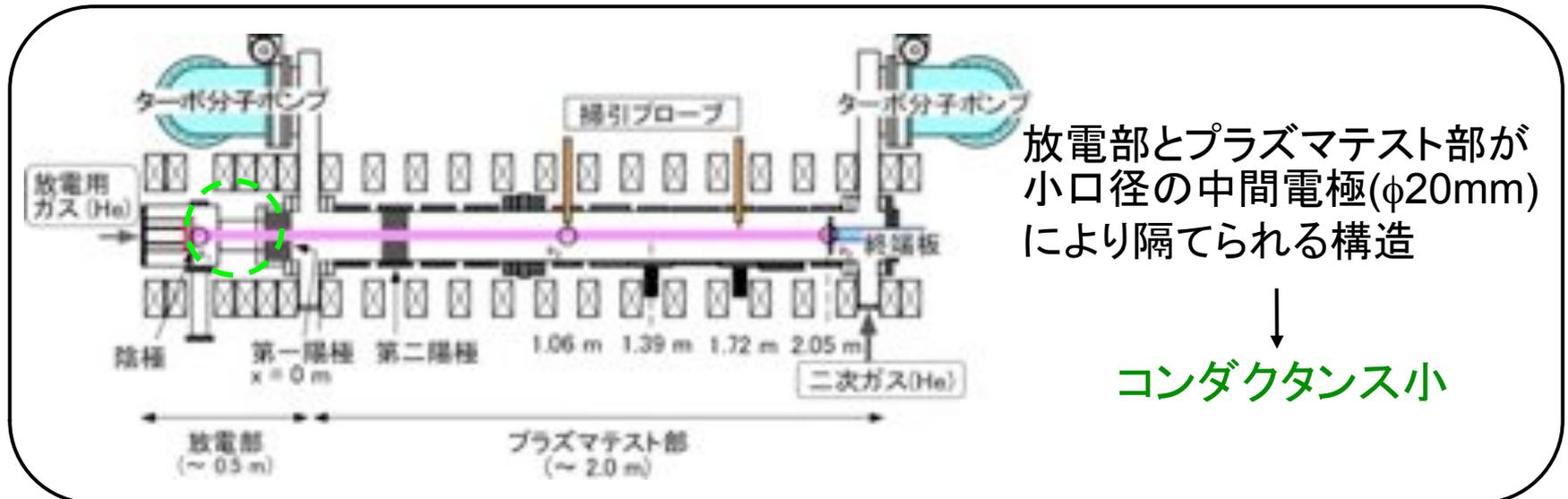
4章: 輸送変化に寄与するキーパラメータ推定が重要



パラメータ依存性の調査には模擬装置の使用が効果的



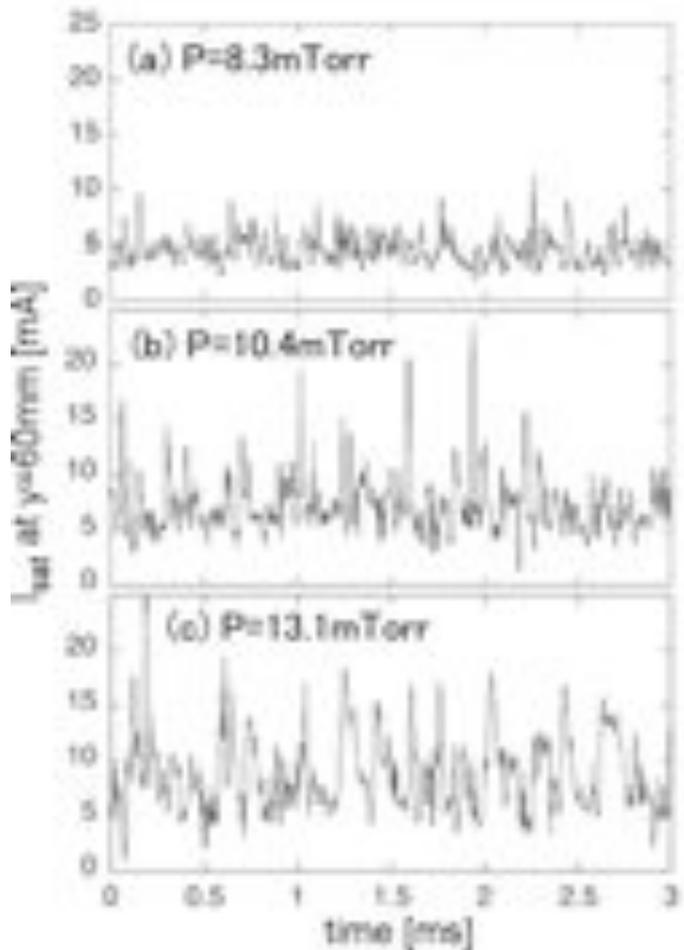
直線型ダイバータ模擬試験装置NAGDIS-II



ほぼ同一のプラズマ源に対して、接触(中性ガス圧P小)・非接触(P大)のダイバータプラズマを放電可能

NAGDIS-IIにおける非拡散的輸送

周辺位置で計測されたイオン飽和電流波形



接触

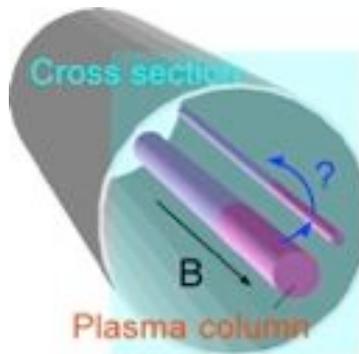
中性ガス圧大

非接触

Plasma Blob様の輸送の存在は確認済み

P大のとき正スパイク揺動増大

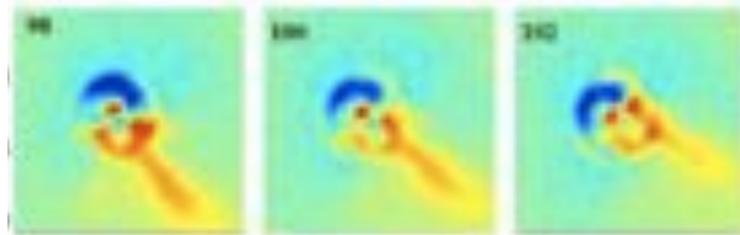
非接触ダイバータ状態時に輸送増大を示唆



磁場を横切る2次元断面内の輸送挙動は不明

輸送の重要な特性(速度・方向)評価ができない

直線型装置CSDXにおけるプラズマ構造



G.Y. Antar *et al.*, Phys. Plasmas **14** (2007) 022301.

N. Ohno *et al.*, J. Plasma Fusion Res. (Rapid Communications) **80** (2004) 275.

I. 經驗の固有直交展開法 (POD)

經驗的固有直交展開 (Proper orthogonal decomposition: POD)

- 多変量解析手法の一つ
- 經驗的直交関数系展開 (Empirical orthogonal function: EOF), Karhunen-Loève (K-L) 展開, 主成分分析 (Principal component analysis: PCA) と呼ばれる

$$\begin{aligned}\tilde{I}(x, t) &= a_1(t)\phi_1(\mathbf{x}) + a_2(t)\phi_2(\mathbf{x}) + \dots \\ &= \sum_{k=1}^n a_k(t)\phi_k(\mathbf{x})\end{aligned}$$

orthogonal basis for time

orthonormal basis for a space domain

$C\phi_i = \lambda_i\phi_i$, C : covariance matrix

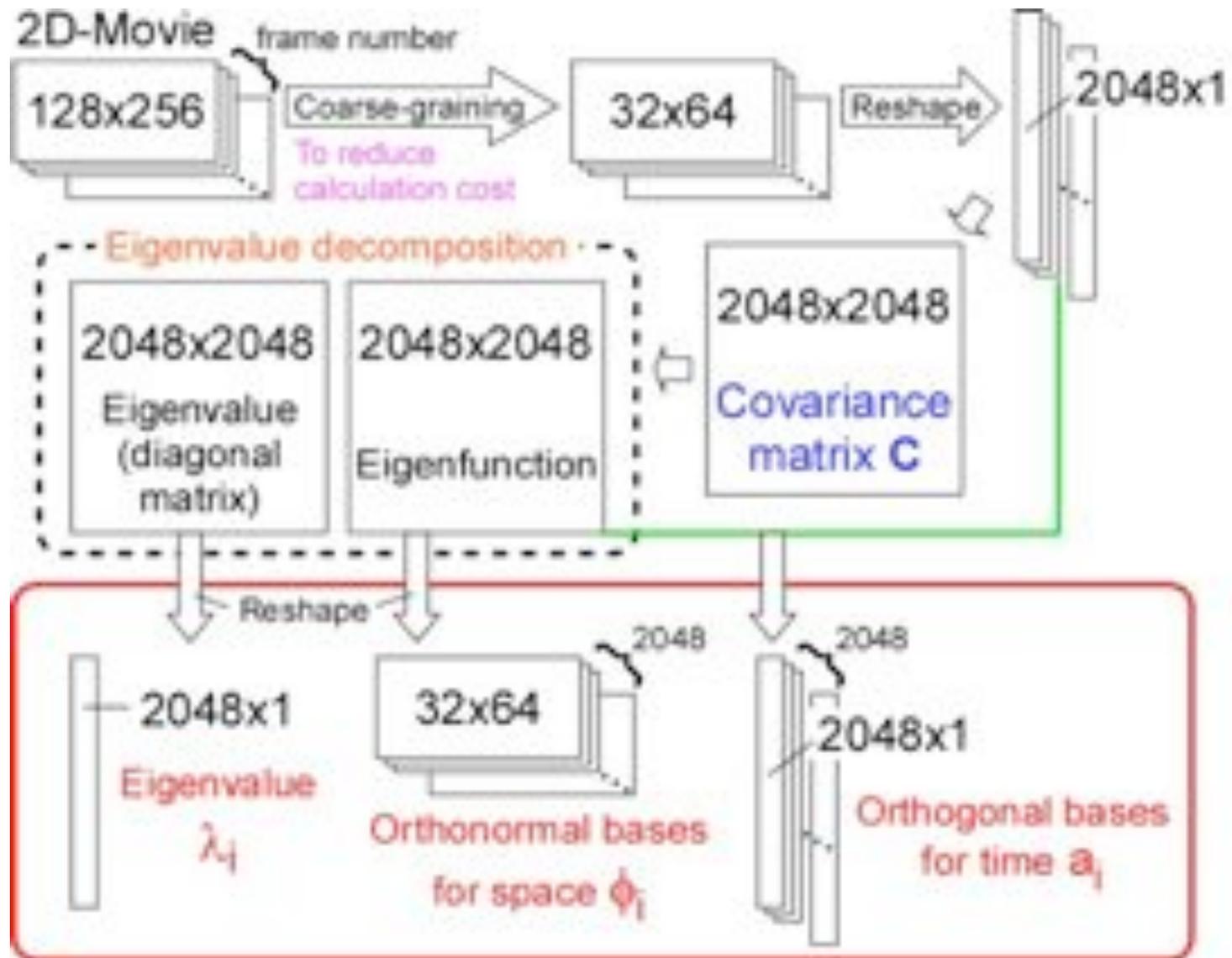
$$C_{ij}(\tau) = \langle \tilde{I}(x_i, t)\tilde{I}(x_j, t+\tau) \rangle$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11}(0) & C_{12}(0) & \dots & C_{1n}(0) \\ C_{21}(0) & C_{22}(0) & \dots & C_{2n}(0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}(0) & C_{n2}(0) & \dots & C_{nn}(0) \end{pmatrix}$$

$$a_i(t) = \sum_{k=1}^n \tilde{I}(x_k, t)\phi_k(x_k)$$

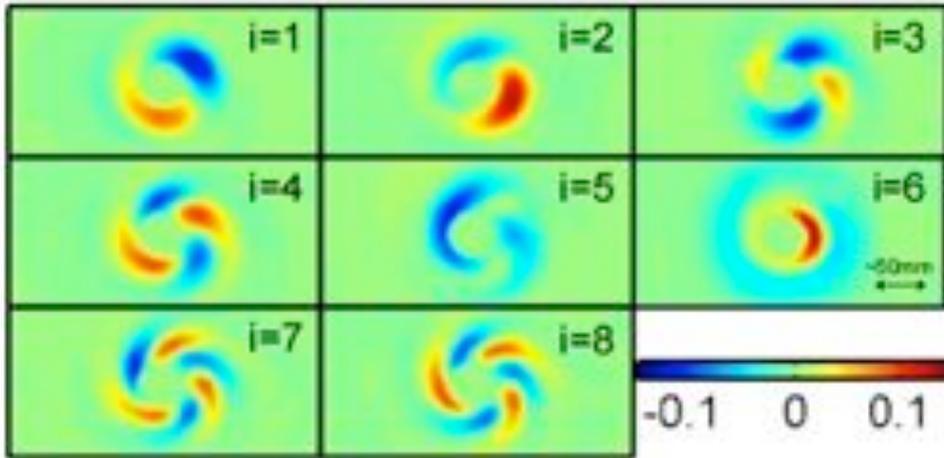
$$\|\phi_i\| = 1 \quad \langle a_i^2 \rangle = \lambda_i$$

I. 動画データに対するPOD解析の適用



I. POD解析結果

Orthonormal bases for space $\phi_i(\mathbf{x})$



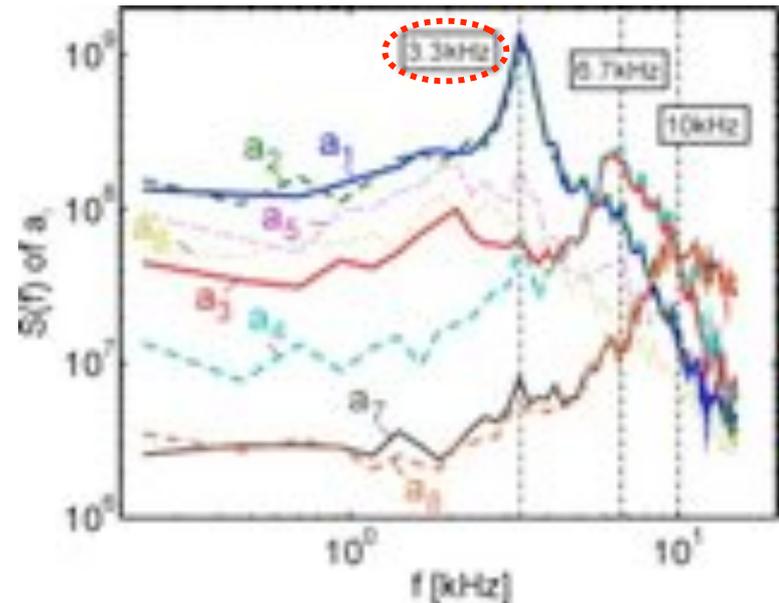
$i=1,2$: 正負一対の構造

... $m=1$ ← 支配的

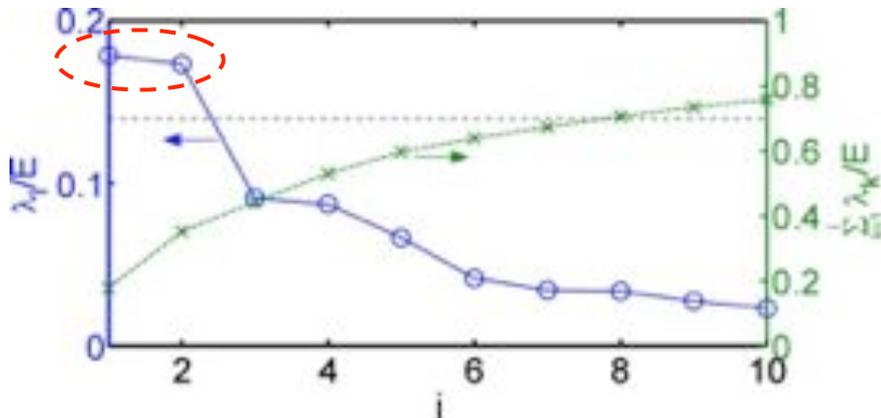
$i=3,4$: 二対の構造 ... $m=2$

$i=7,8$: 三対の構造 ... $m=3$

Power spectra of orthogonal bases for time $a_i(t)$



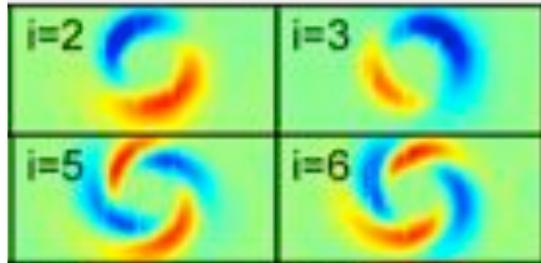
Ratio between eigenvalue and energy



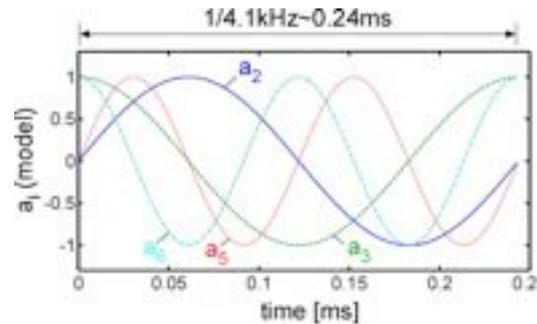
$$E \equiv \sum_{k=1}^n \langle \tilde{I}^2(x_k, t) \rangle = \sum_{i=1}^n \langle a_i^2 \rangle = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

有意な基底を用いた揺動の再構成

空間の基底 $\phi_i(x)$

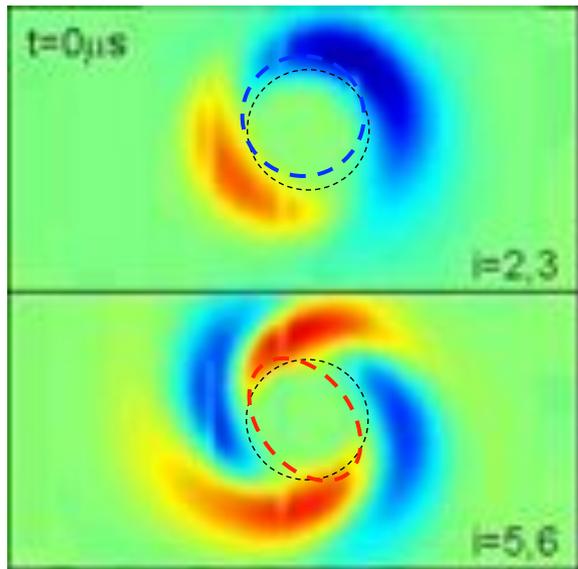


高時間分解能モデル波形



a_2, a_3 : sine and cosine wave ($f=4.1\text{kHz}$)
 a_5, a_6 : sine and cosine wave ($f=8.2\text{kHz}$)

再構成動画 ($i=2+3, 5+6$)



$$\begin{cases} \tilde{I}_{2+3}(x, t) = a_2(t)\phi_2(x) + a_3(t)\phi_3(x) \\ \tilde{I}_{5+6}(x, t) = a_5(t)\phi_5(x) + a_6(t)\phi_6(x) \end{cases}$$

一つの構造の回転 ← $m=1$ から剥離?

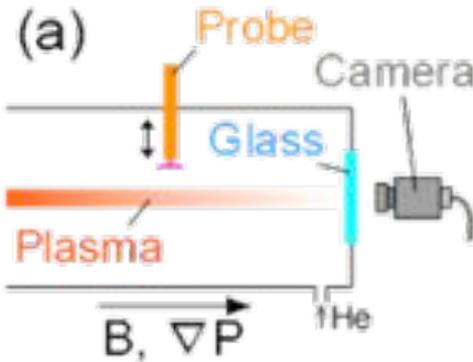
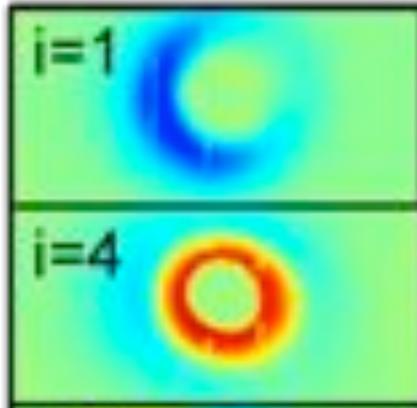
$$v_r \sim 50\text{m/s}, v_\theta \sim 390\text{m/s} (r=15\text{mm})$$

二つの構造の回転 ← $m=2$ から剥離?

$$v_r \sim 150\text{m/s}, v_\theta \sim 390\text{m/s} (r=15\text{mm})$$

径方向速度は実際よりも過小評価

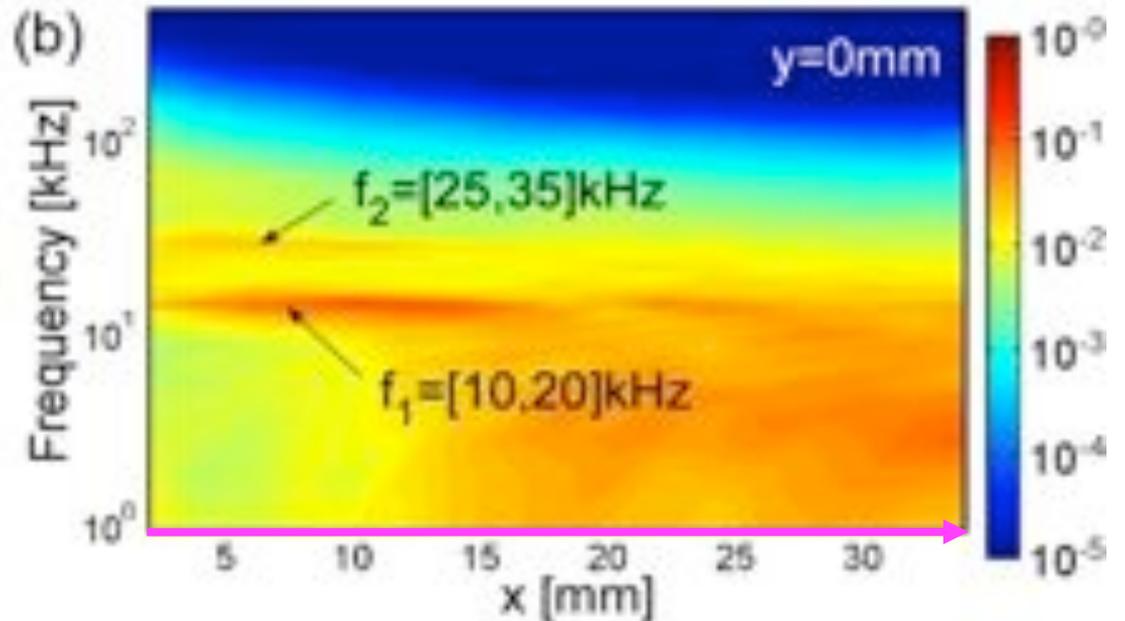
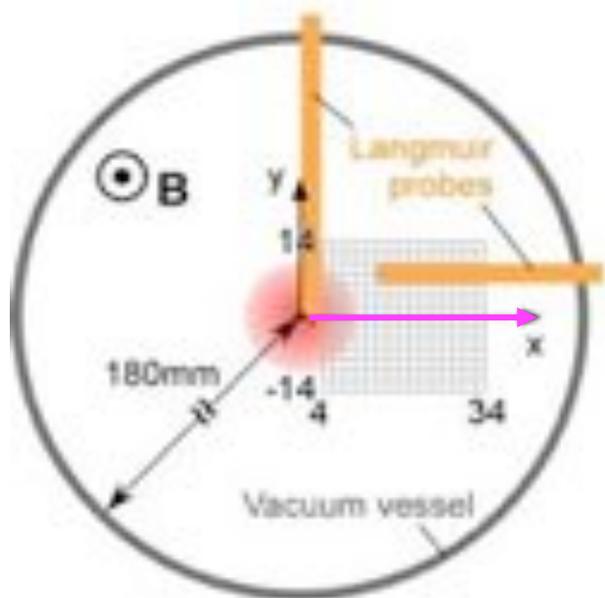
接触プラズマ計測



分散大の*i*=1,4の基底は？

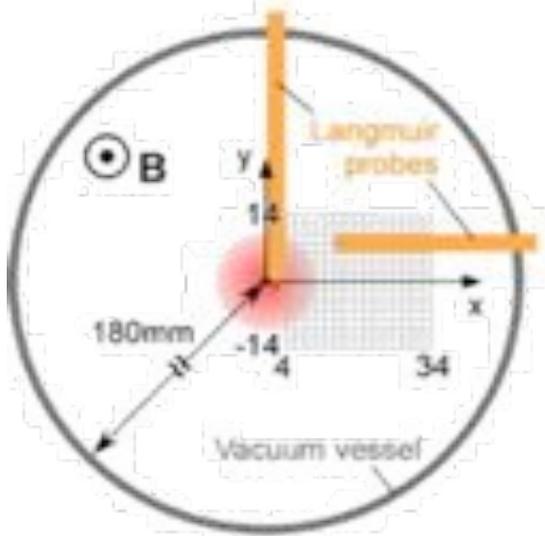
上流側(接触プラズマ)からの発光 or 発光情報特有

パワースペクトル(対数プロット、接触プラズマ)



周波数が高い(≡現象が速い)ため露光時間中に現象が進展

時空間相関



プローブ一本を固定、一本を移動

x=4:2:34mm, y=-14:2:14mm, 計240箇所

サンプリング周波数1MHz, 50000点

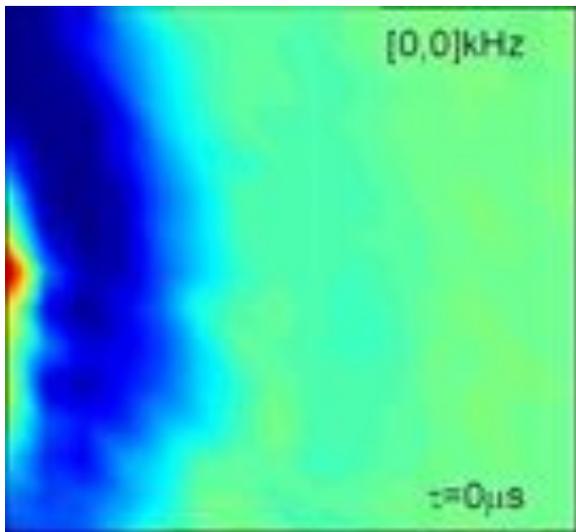
時空間相関関数

$$C_{ij}(\tau) = \langle \tilde{I}(x_i, t) \tilde{I}(x_j, t + \tau) \rangle$$

時空間相関係数

$$R_{ij}(\tau) = \langle \tilde{I}(x_i, t) \tilde{I}(x_j, t + \tau) \rangle / \langle \tilde{I}^2(x_i) \rangle^{1/2} \langle \tilde{I}^2(x_j) \rangle^{1/2}$$

$C(\tau)$ 、カラー軸=[-0.4, 0.4]



↑全ての周波数成分を平均化したもの

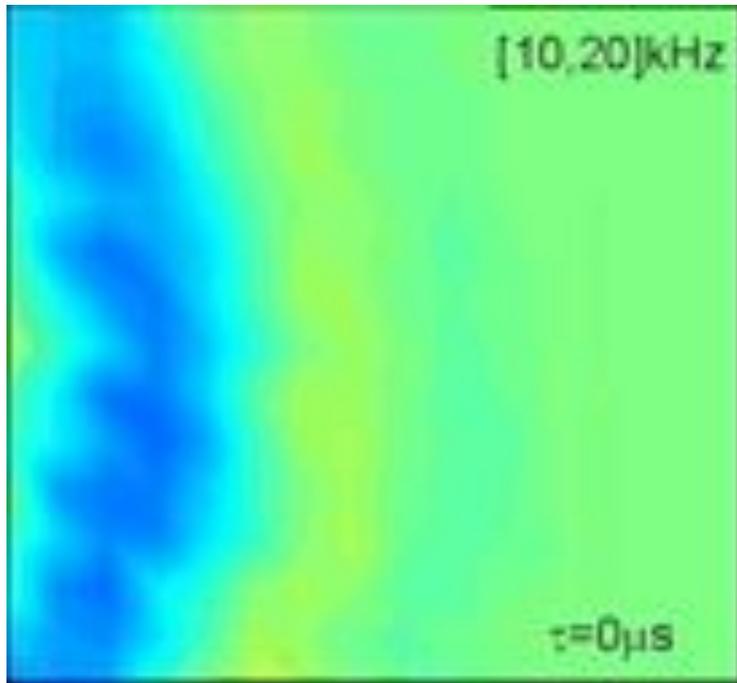
三成分分解＋時空間相関

揺動成分 \tilde{I} が周期成分 I_f と非周期成分 I_b の和であると考えたとき(三成分分解)

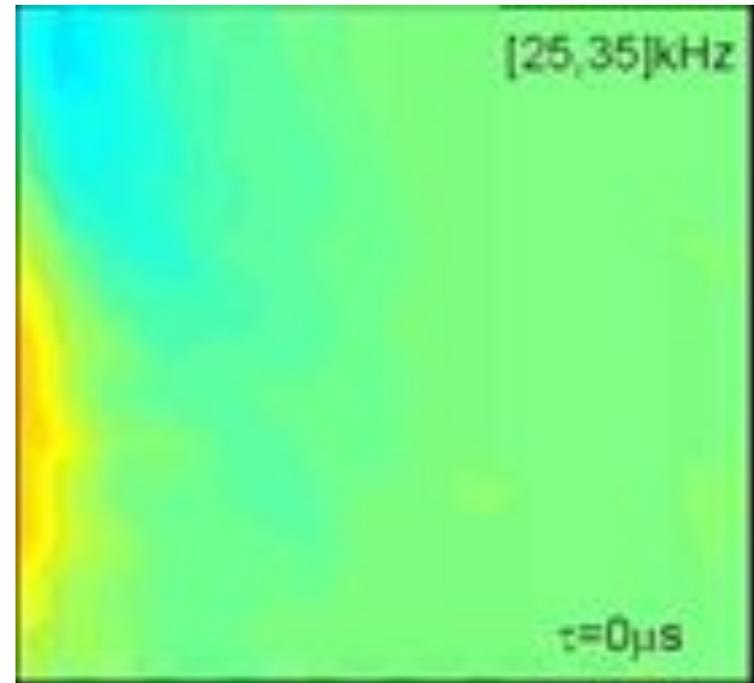
$$I = \bar{I} + \tilde{I} = \bar{I} + I_f + I_b$$

周期成分に起因する時空間相関関数を定義: $C_{ij}(\tau) \equiv \langle I_f(x_i, t) \tilde{I}(x_j, t + \tau) \rangle$

$f_1 = [10, 20] \text{kHz}$



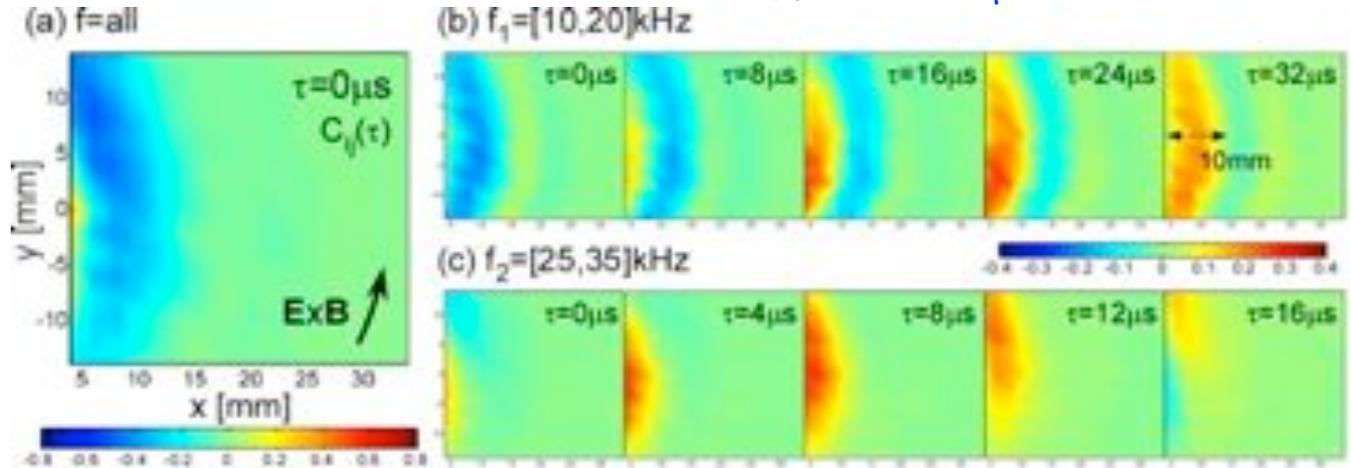
$f_2 = [25, 35] \text{kHz}$



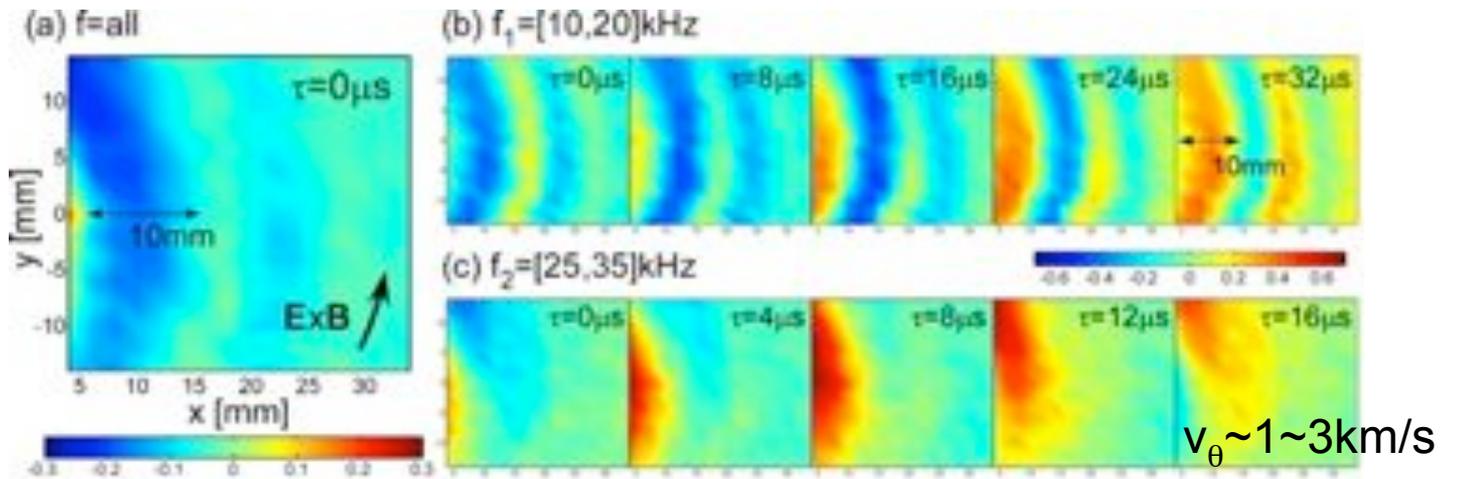
径方向速度の概算

露光時間 $33\mu\text{s}$ では現象を追えない

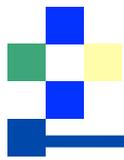
相関関数C



Cを各周期成分の標準偏差で無次元化



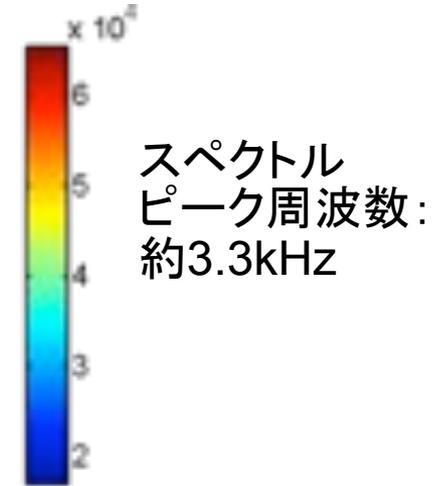
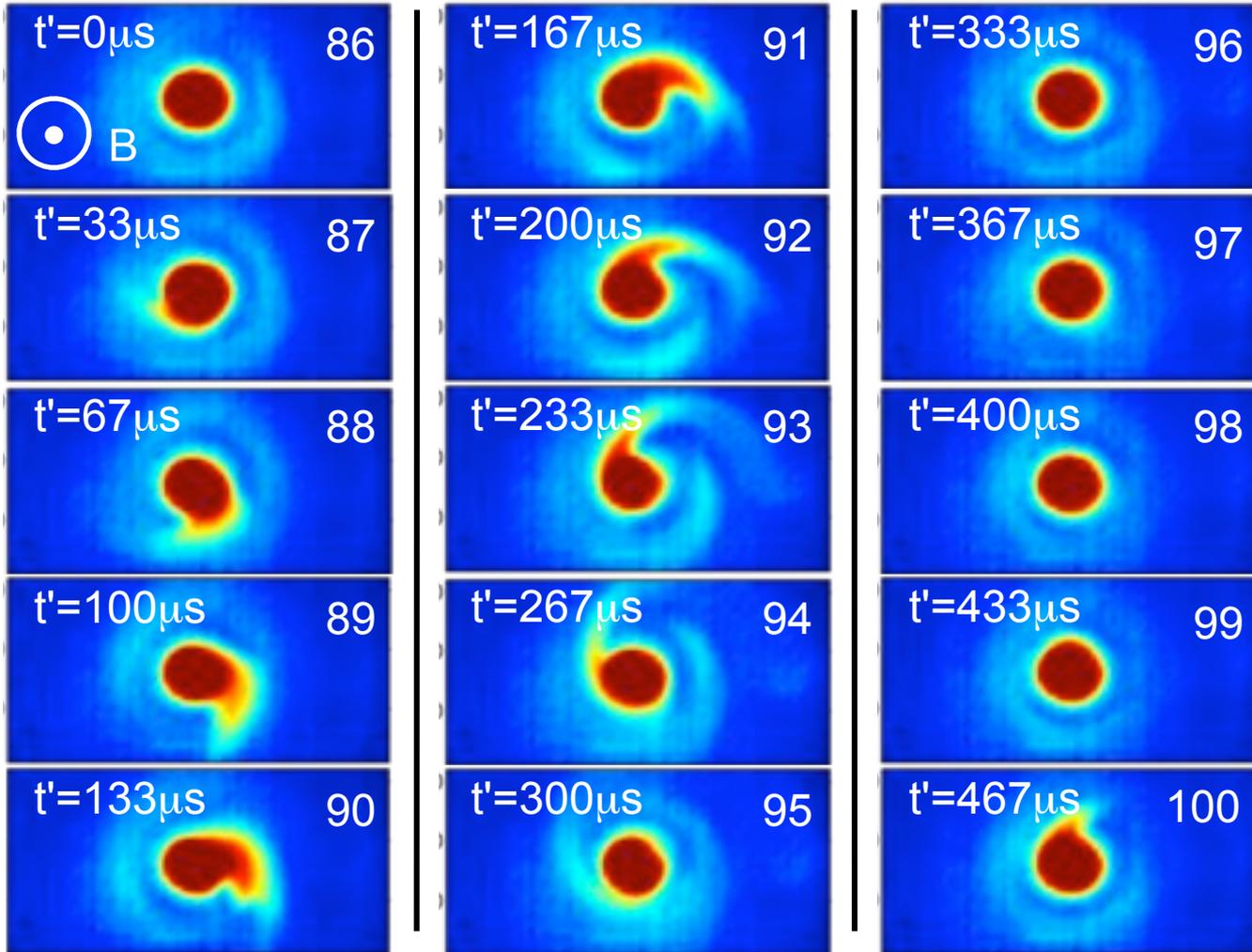
径方向速度 f_1 : $v_r \sim 310 \text{ m/s}$, f_2 : $v_r \sim 830 \text{ m/s}$



動画のスナップショット

スナップショット

P=74mTorr, B=0.05T



解析方法

- 動画データから
- ・プラズマ放出現象発生位置・時刻を検出
- ・統計的解析手法の適用

Shutter speed: 100000s⁻¹ / Frame rate: 30000fps

⇒プラズマ放出位置は回転、発生は間欠的

① シングル+四探針プローブ同時計測

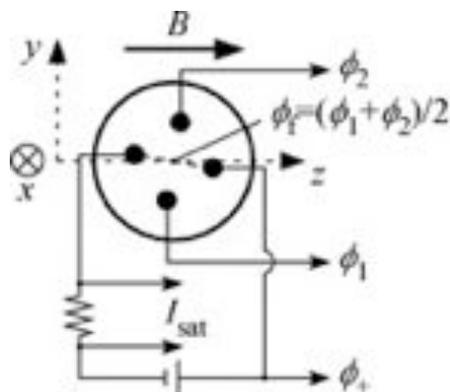
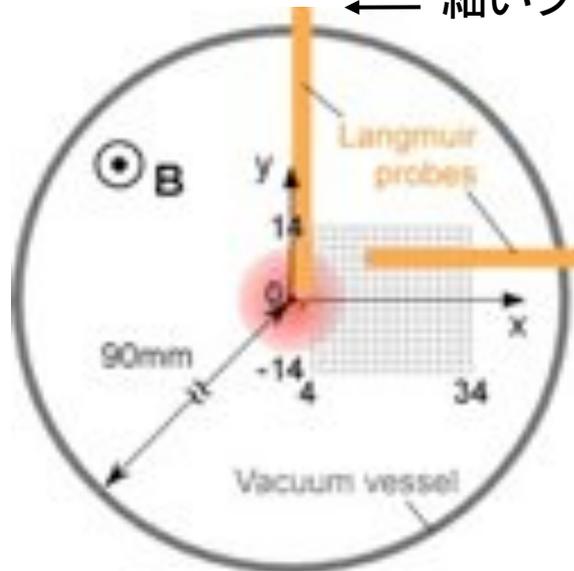
以前の計測系

実験日: 2010/07/21

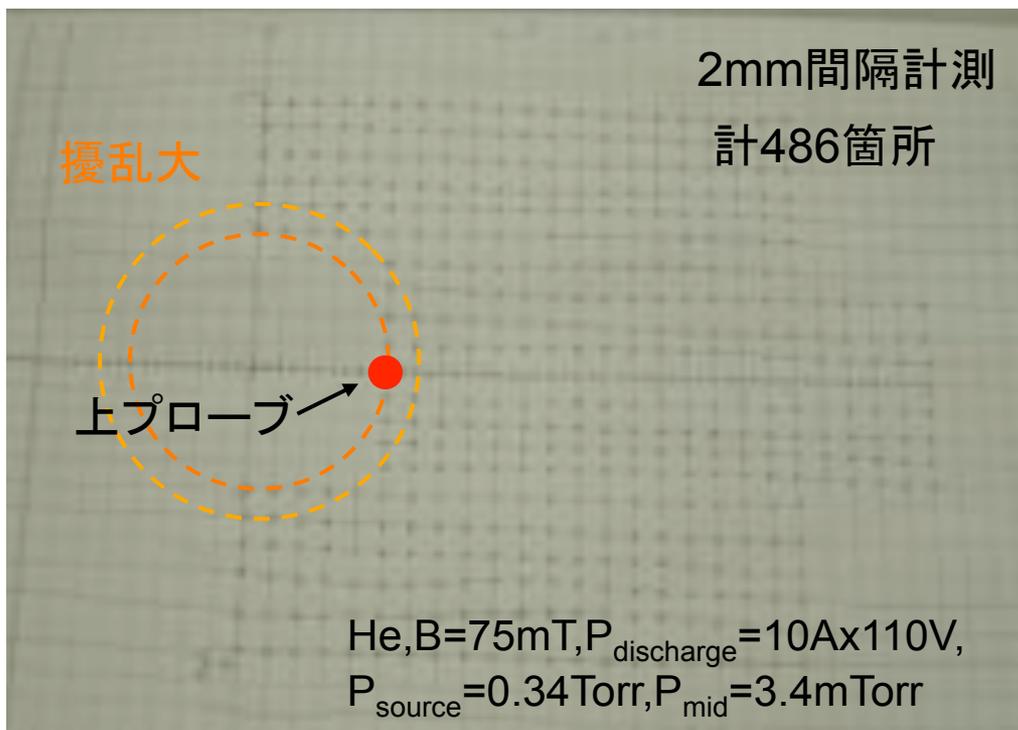
← 細いプローブ(I_{sat})に変更

四探針プローブに変更
($I_{sat}, V_f, n_e, T_e, V_p, E, V_{ExB}, \Gamma$)

参照プローブとして細いプローブ、
移動プローブとして四探針プローブを使用



四探針プローブにより計測された T_e, V_s は過大評価



He, $B=75\text{mT}$, $P_{\text{discharge}}=10\text{Ax}110\text{V}$,
 $P_{\text{source}}=0.34\text{Torr}$, $P_{\text{mid}}=3.4\text{mTorr}$

まとめ

- 非接触プラズマによるプラズマ対向壁への熱流制御は、定常高性能炉心プラズマ制御の基盤を与える。
- 直線型ダイバータ模擬装置を用いた基礎研究により非接触プラズマの物理的理解は著しく進展した。
 - 電子-イオン体積再結合過程の観測と非接触プラズマ特性の解明
 - 分子活性化再結合過程（水素，炭化水素）の実証
 - 非接触プラズマとELM様熱負荷との相互作用（Inverse ELM現象の理解 - 再接触現象）
- 実機への適用に関しては、非接触プラズマの長時間維持・制御研究は重要な課題