

平成24年ダイバータおよびPWI合同研究会

日時: 平成24年7月23日(月) - 24日(火)

場所: 筑波大学内・筑波大学自然 B 棟 119 講義室

非接触プラズマ研究と課題

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

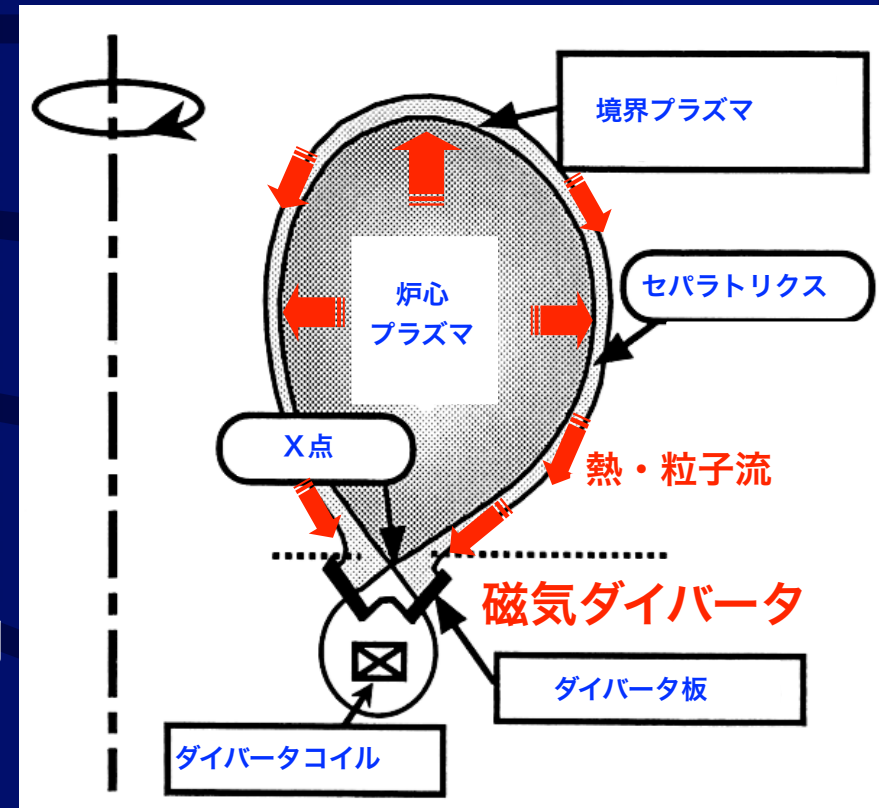
- 炉壁の耐久性
- 燃料粒子，不純物粒子輸送制御

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

- 非接触プラズマの理解と制御

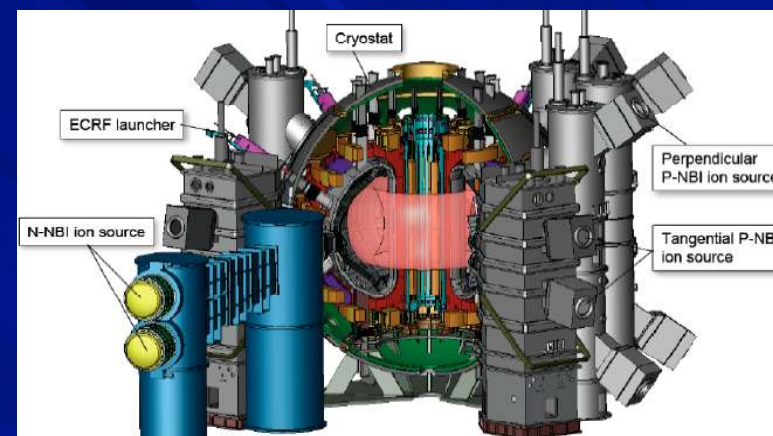


JT-60SAでのダイバータ板への熱負荷評価

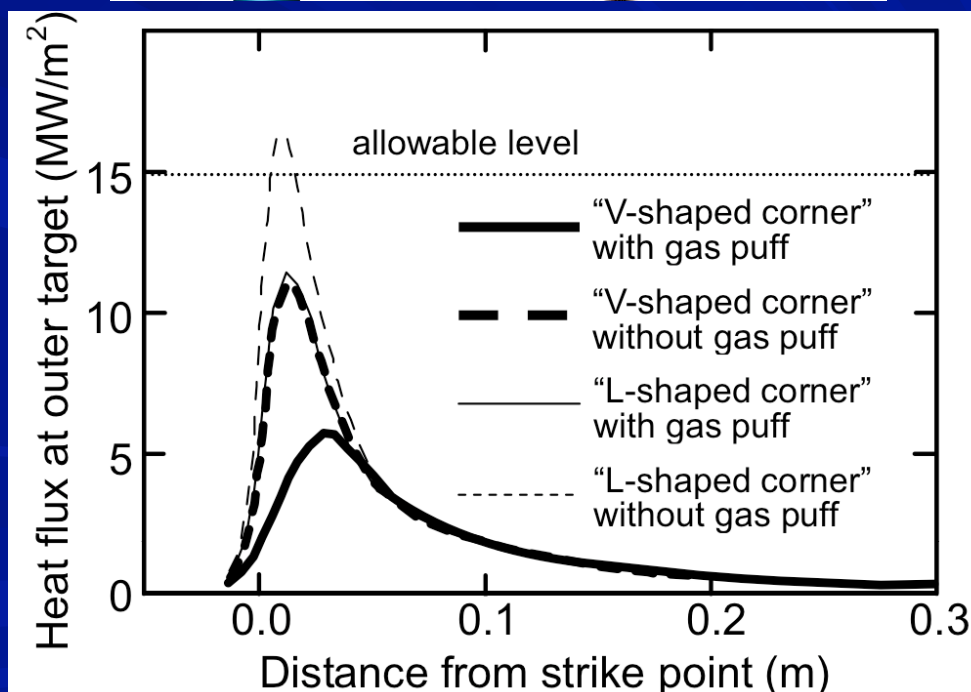
- 具体的な設計を行うと問題が顕在化
 - 過酷な熱・粒子負荷

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
Traianularity δ_{95}	0.45	0.36
Safety Factor q_{95}	3.11	3.06
Flat Top	100 sec (8 hours in future option)	
H&CD Power	41 MW x 100 sec	
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 x 10 ²¹	



部分非接触プラズマの
定常維持を前提とした
設計



非接触プラズマとは

- (1) ダイバータ部あるいはSOL領域からの強い放射損失
- (2) ダイバータ板近くのプラズマ温度の著しい低下
- (3) ダイバータ領域における中性ガス密度の増大
- (4) ダイバータ板へのプラズマ粒子束及び熱流束の著しい低下
- (5) ダイバータ領域において**磁力線に沿ったプラズマ圧力の低下**

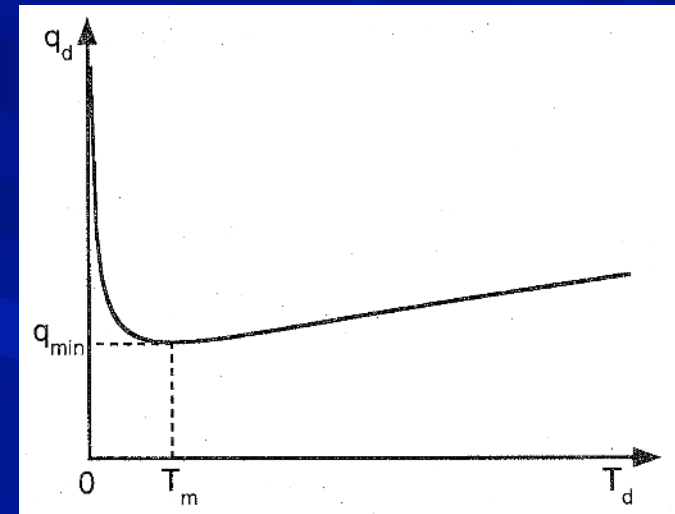
$$q_d = \Gamma_d \{(\gamma + M_d^2) T_d + E_I\}$$

$$E_I = E_H + (\xi - E_H)/2$$

$$q_d = M_d p_d \frac{\gamma' T_d + E_I}{\sqrt{m_i T_d}}$$

$$\gamma + M_d^2 = \gamma'$$

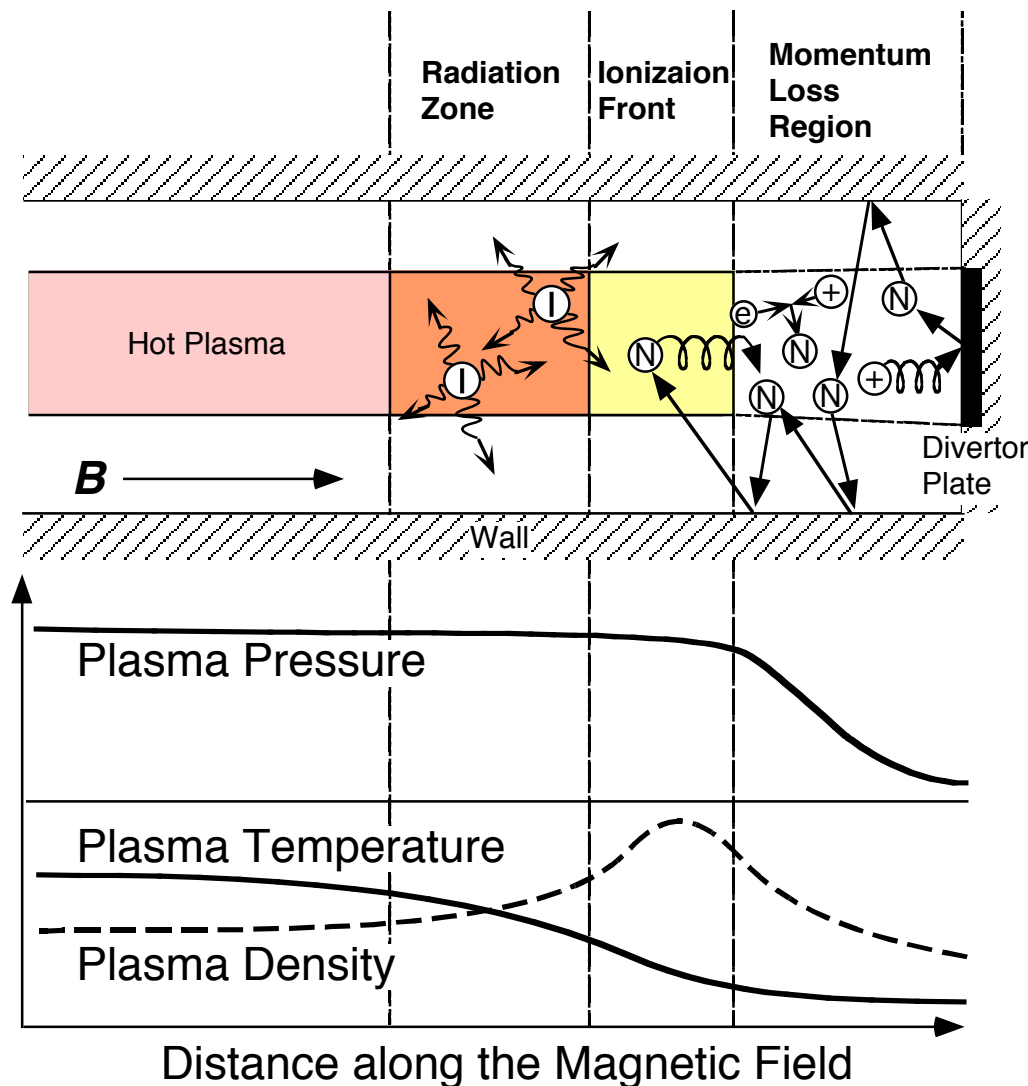
$$\nabla_{\parallel} (nm_i V^2 + p) = -m_i n \{ (V - V_0) \langle \sigma v \rangle_{cx, i-n} n_0 + V \langle \sigma v \rangle_{\text{recomb}} n_e \}$$



Dependence of plasma heat load on the temperature of divertor plasma with a fixed plasma pressure.

高村秀一：プラズマ核融合学会誌1996

非接触プラズマの構造



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

非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合 (水素、炭化水素)

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性 (門先生)

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象 (Plasma Blobs) (田中先生)

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果 (部分非接触)

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定-コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場 (磁気島) (増崎先生)

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 -ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合 (水素、炭化水素)

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性 (門先生)

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象 (Plasma Blobs) (田中先生)

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果 (部分非接触)

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場 (磁気島) (増崎先生)

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

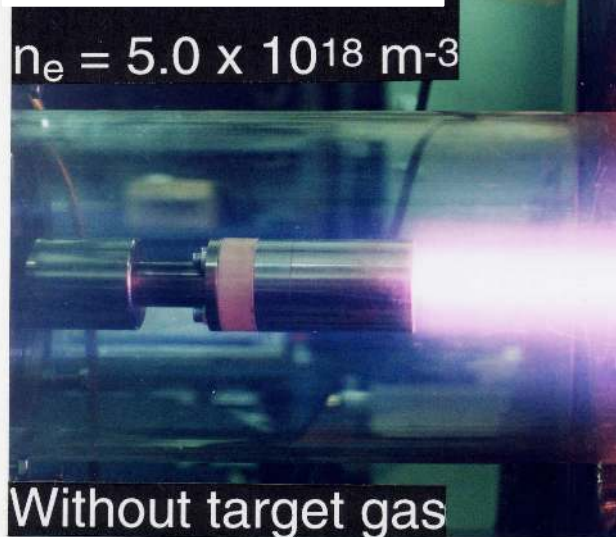
Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

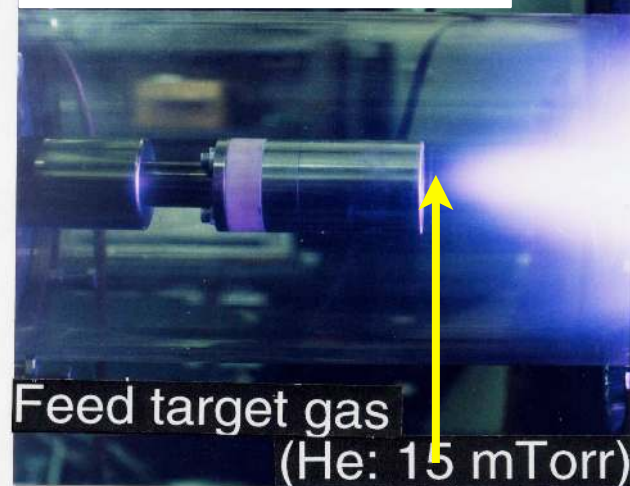
Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

非接触プラズマの生成と電子-イオン再結合過程

接触プラズマ

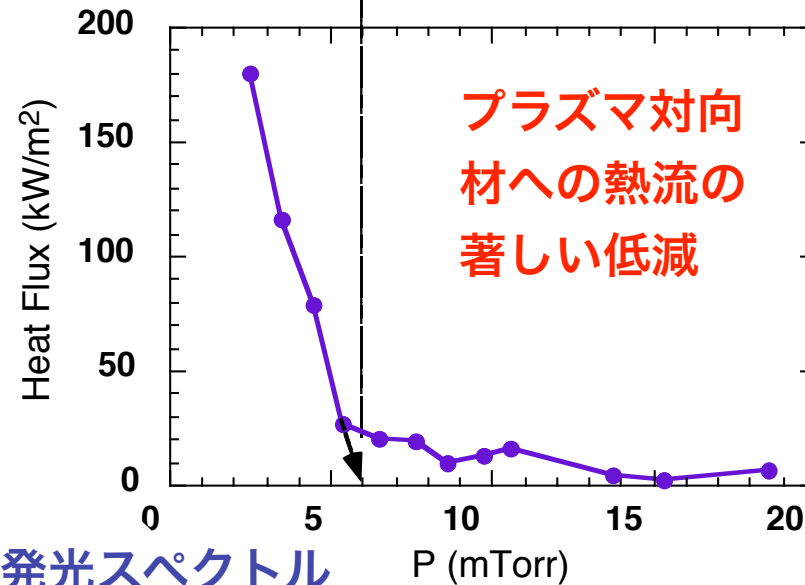


非接触プラズマ

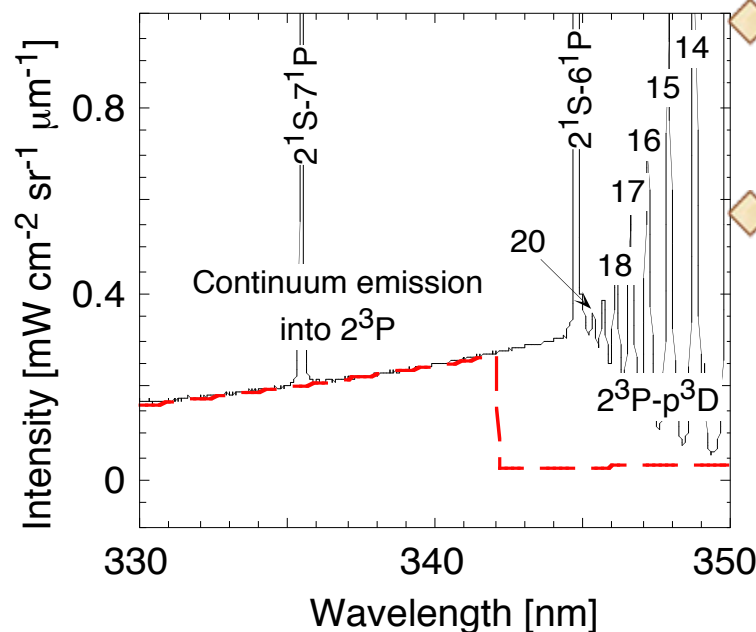


ガスバッファ層の形成

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

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)



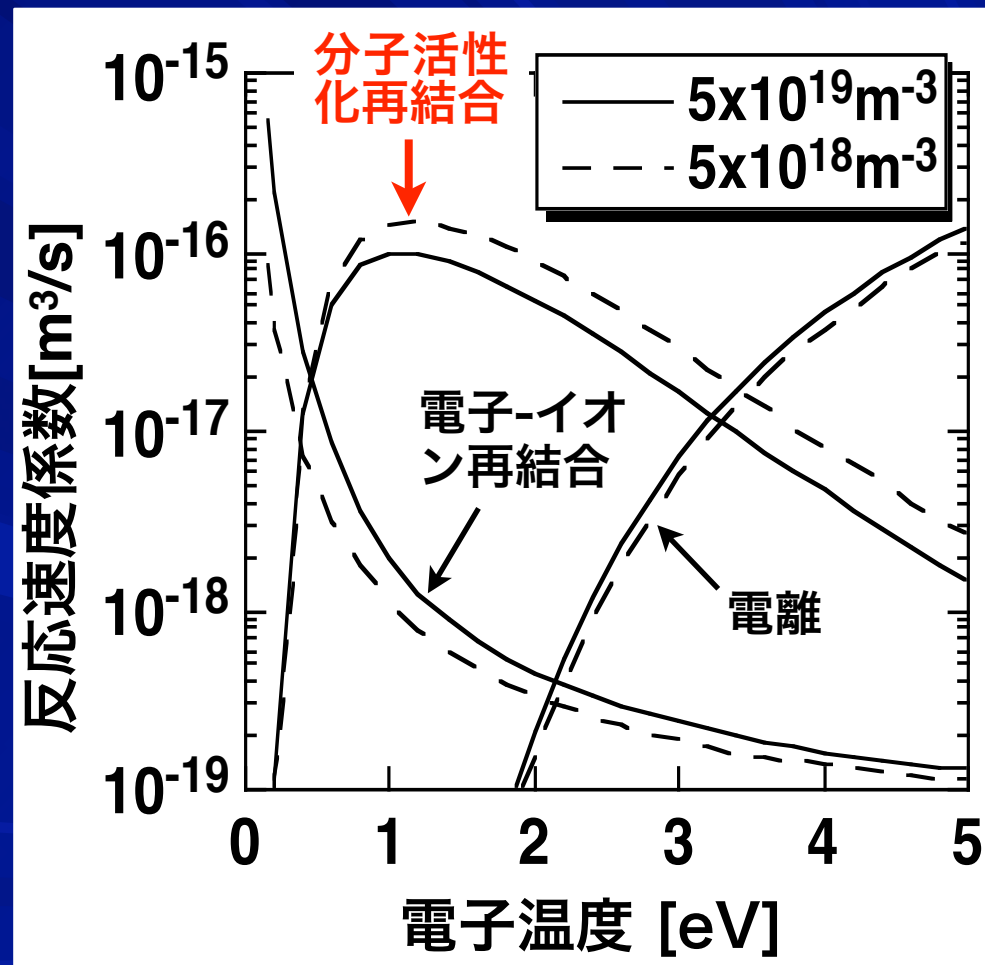
(解離性再結合)

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

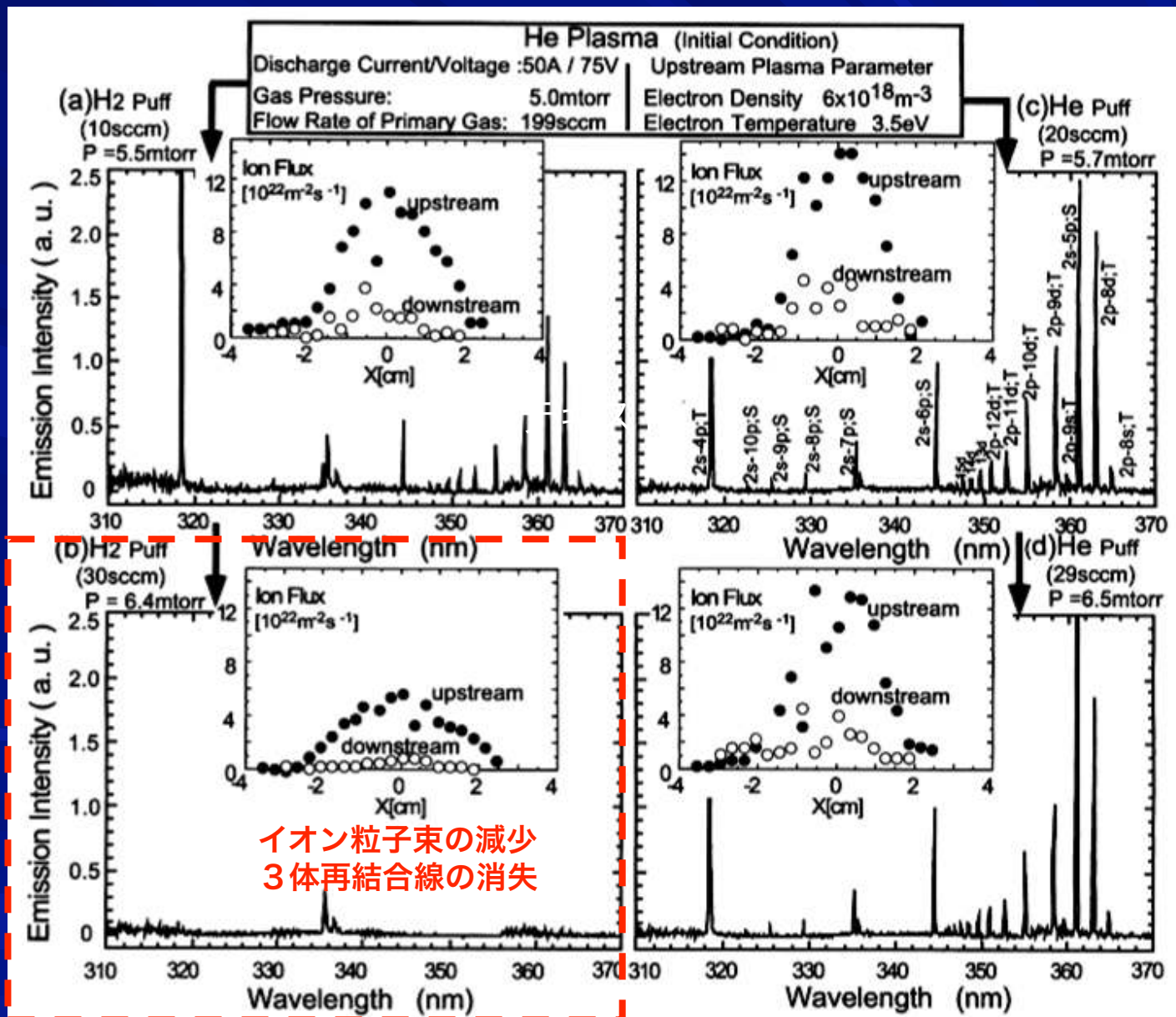
粒子バランス

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = \langle \sigma v \rangle_{\text{ion}} n_e n_n - \langle \sigma v \rangle_{\text{EIR}} n_e^2 - \langle \sigma v \rangle_{\text{MAR}} n_e n_{\text{H}_2}$$

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

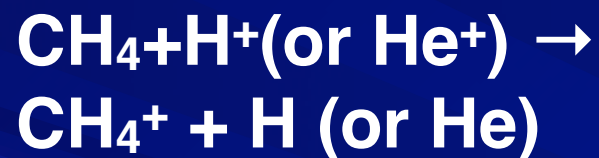


水素ガス
導入

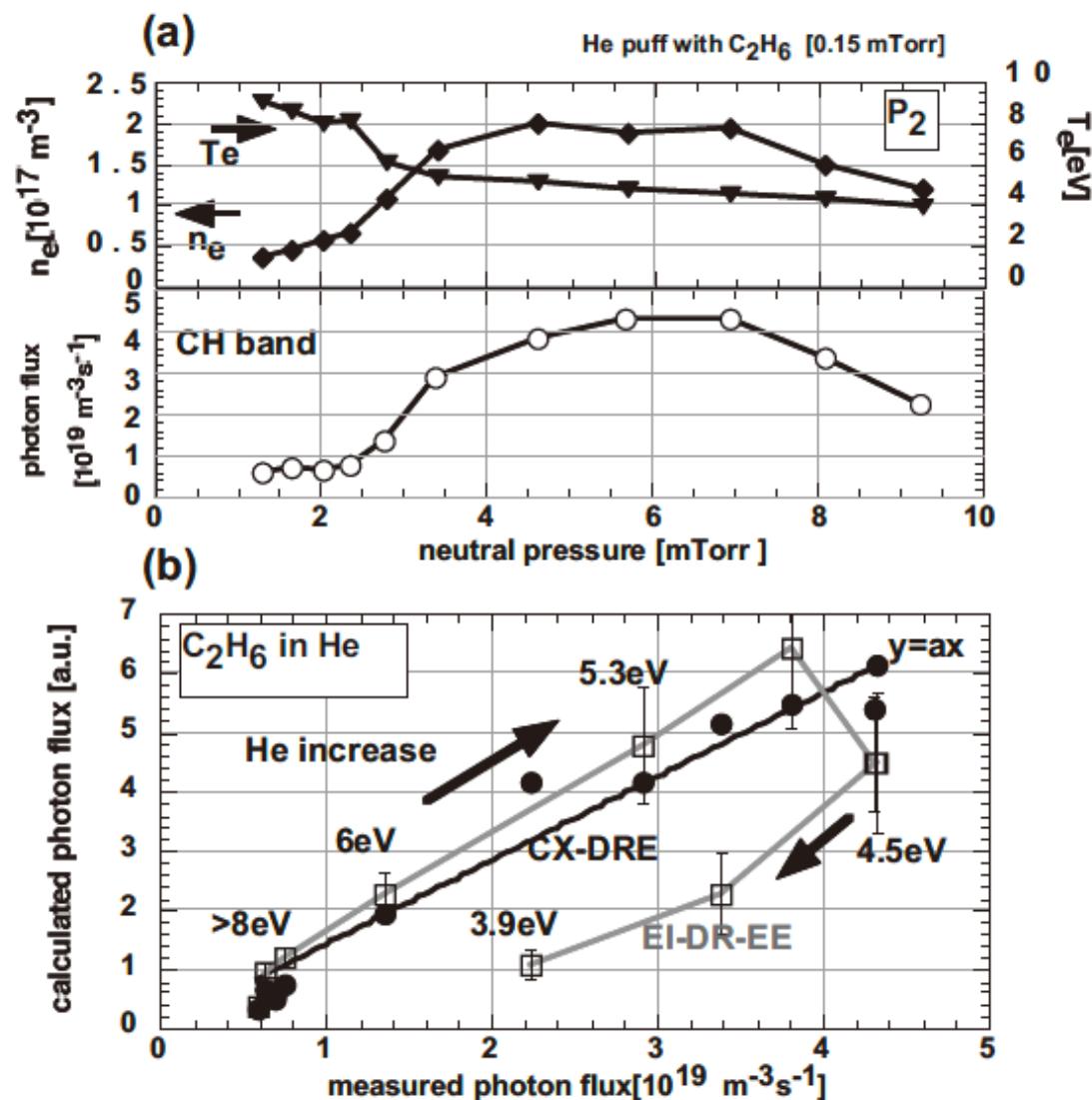
ヘリウム
ガス導入

N. Ohno *et al.*,
 PRL
 81(1998)818

炭化水素分子活性化再結合の実証



MAP-IIでの
実験的検証



非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

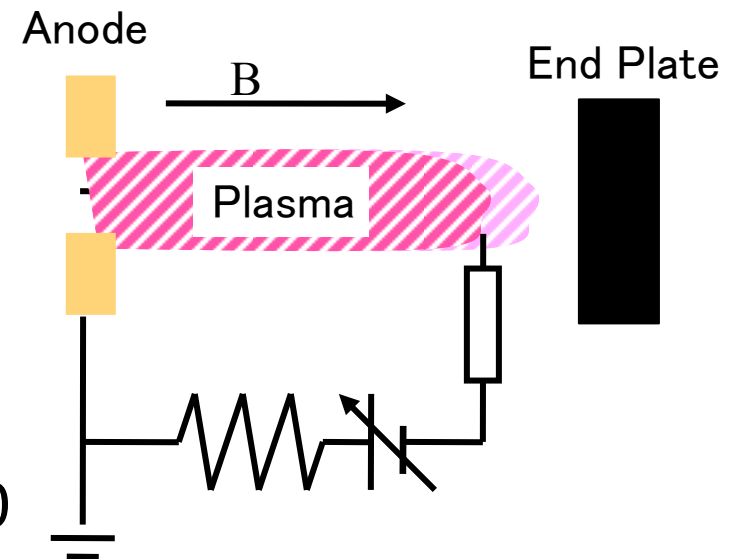
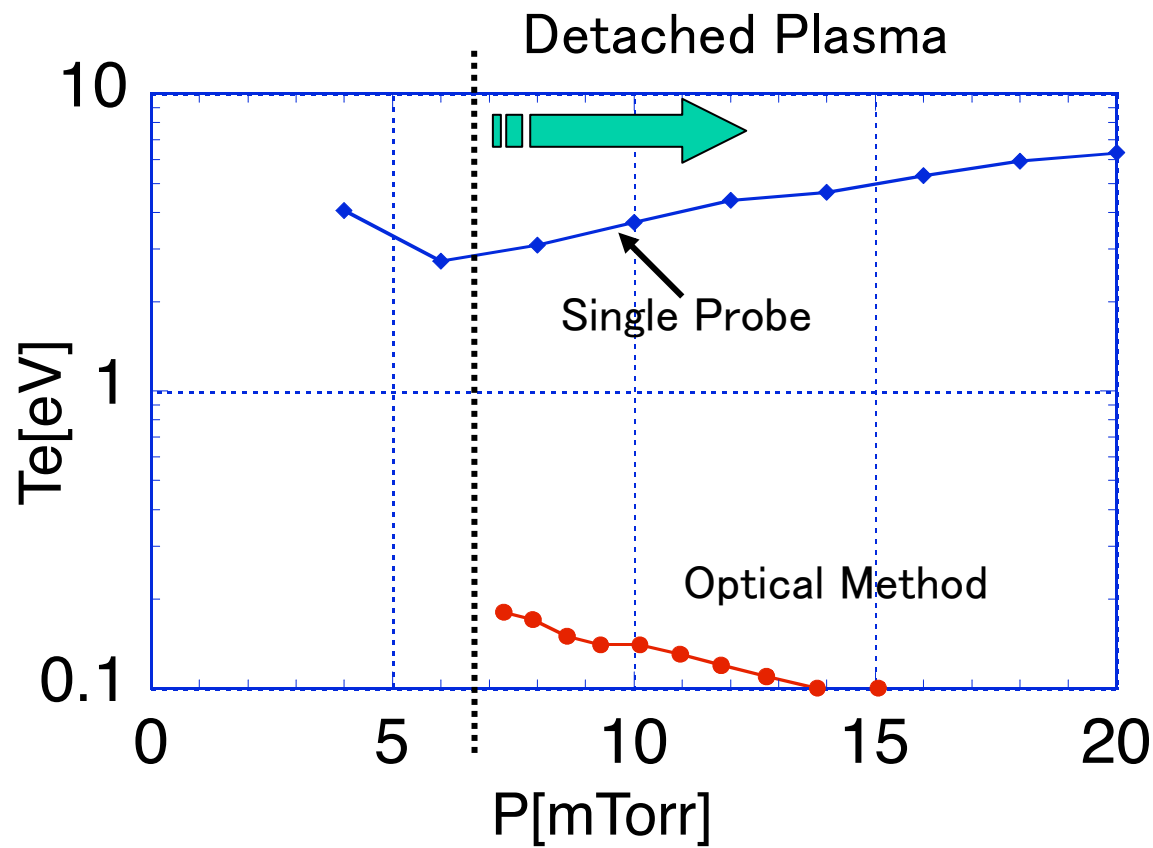
(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

プローブ特性の異常性



非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

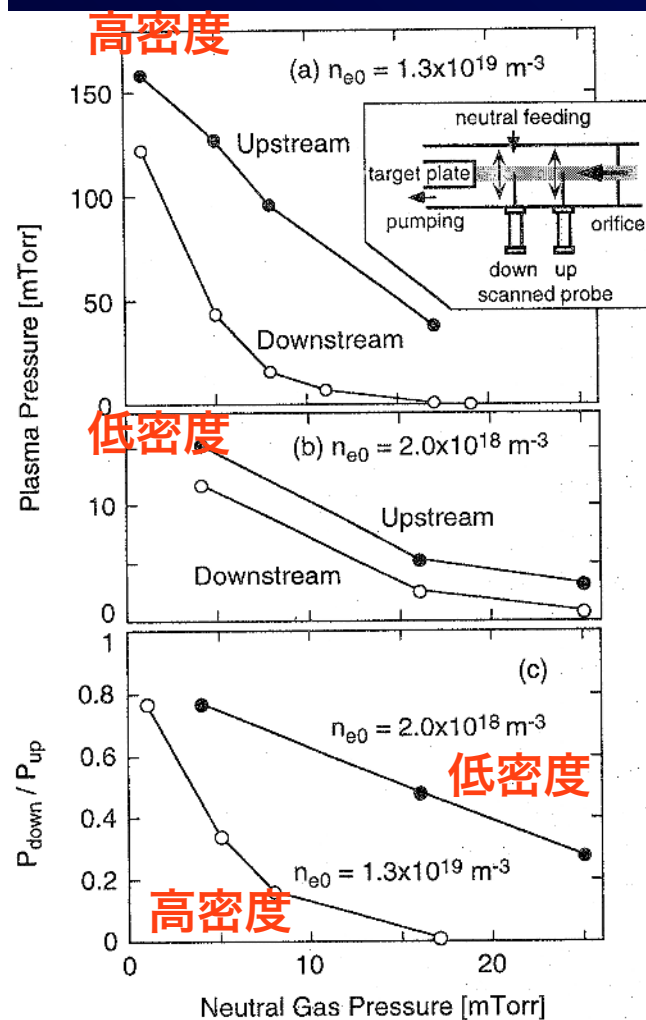
Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

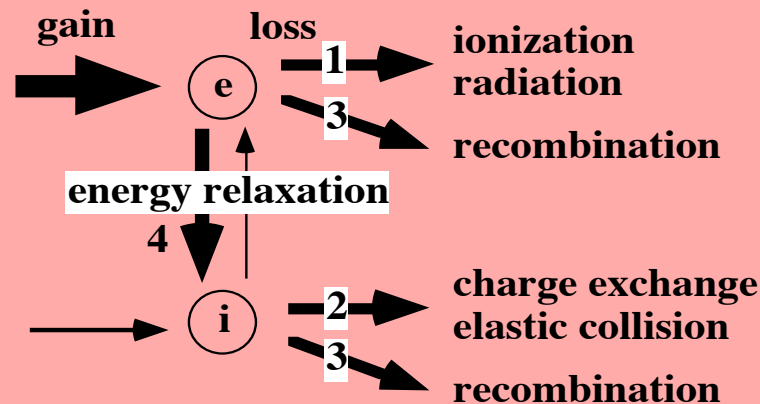
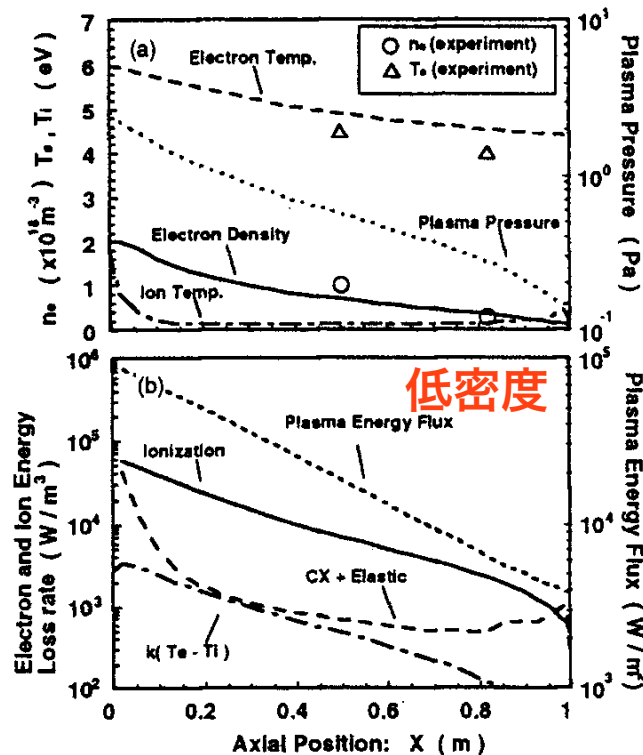
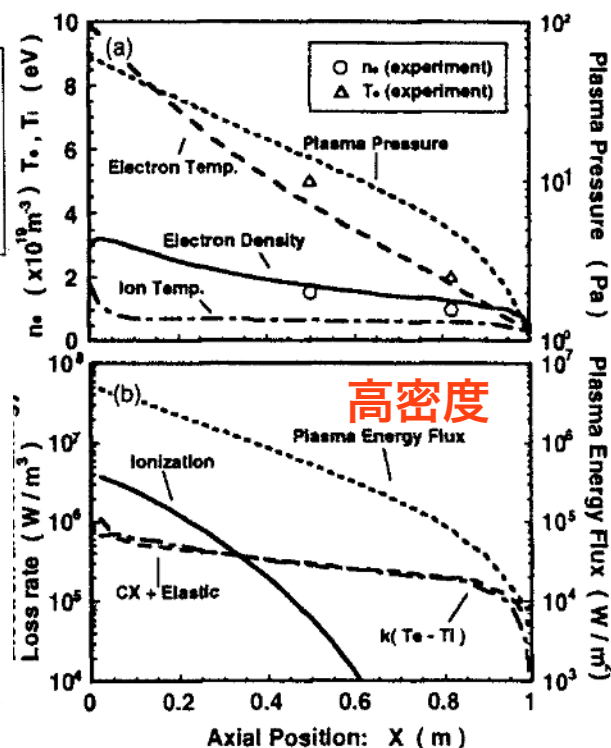
非接触プラズマ中のエネルギーバランス

NAGDIS, Nagoya Univ.



N. Ezumi JNM1997

非接触プラズマ生成
に密度の閾値が存在



N. Ohno CPP1996

電子-イオン間のエネルギー緩和が重要
⇒
中性ガス温度がイオン温度を決める

非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

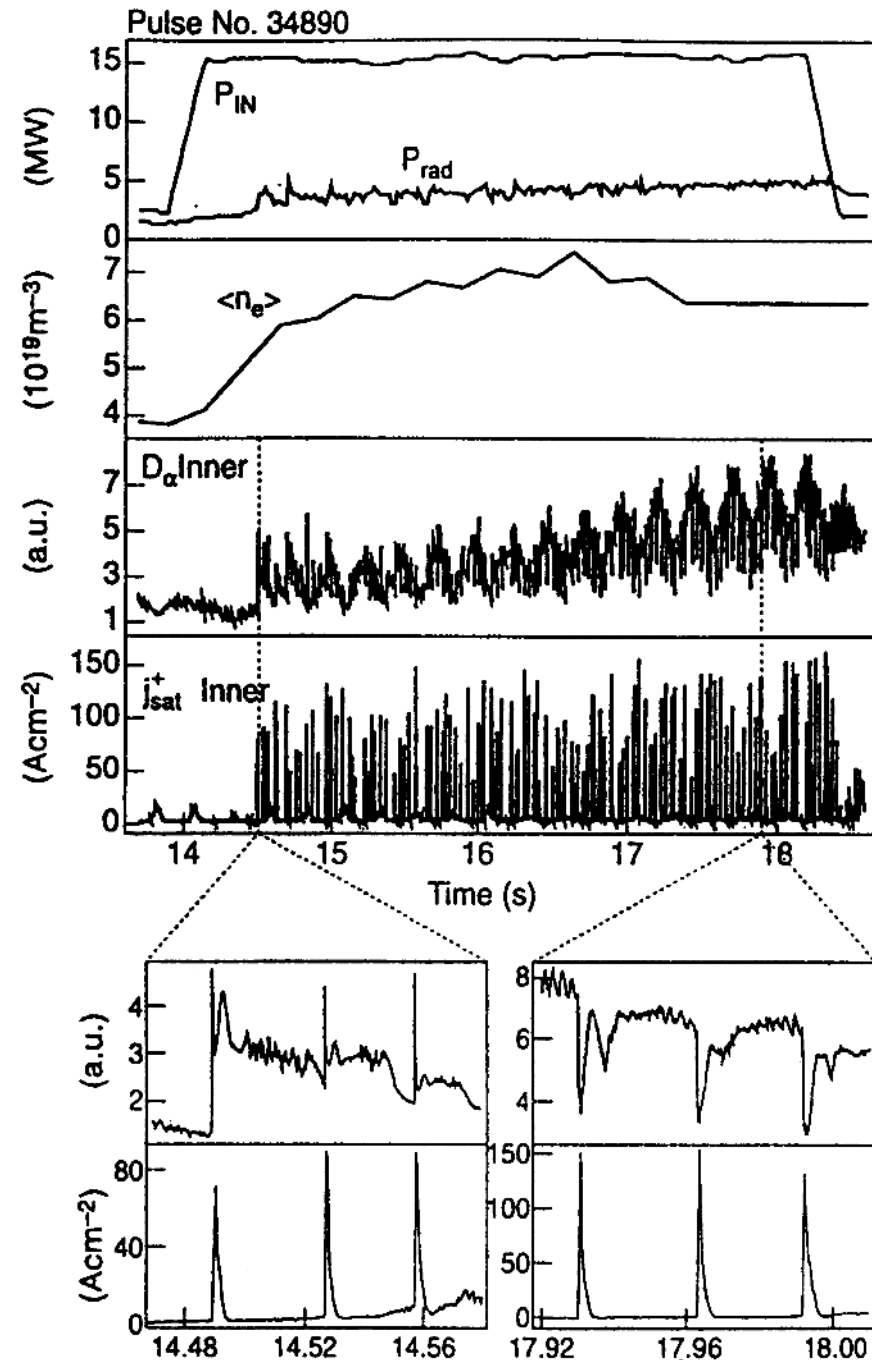
NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

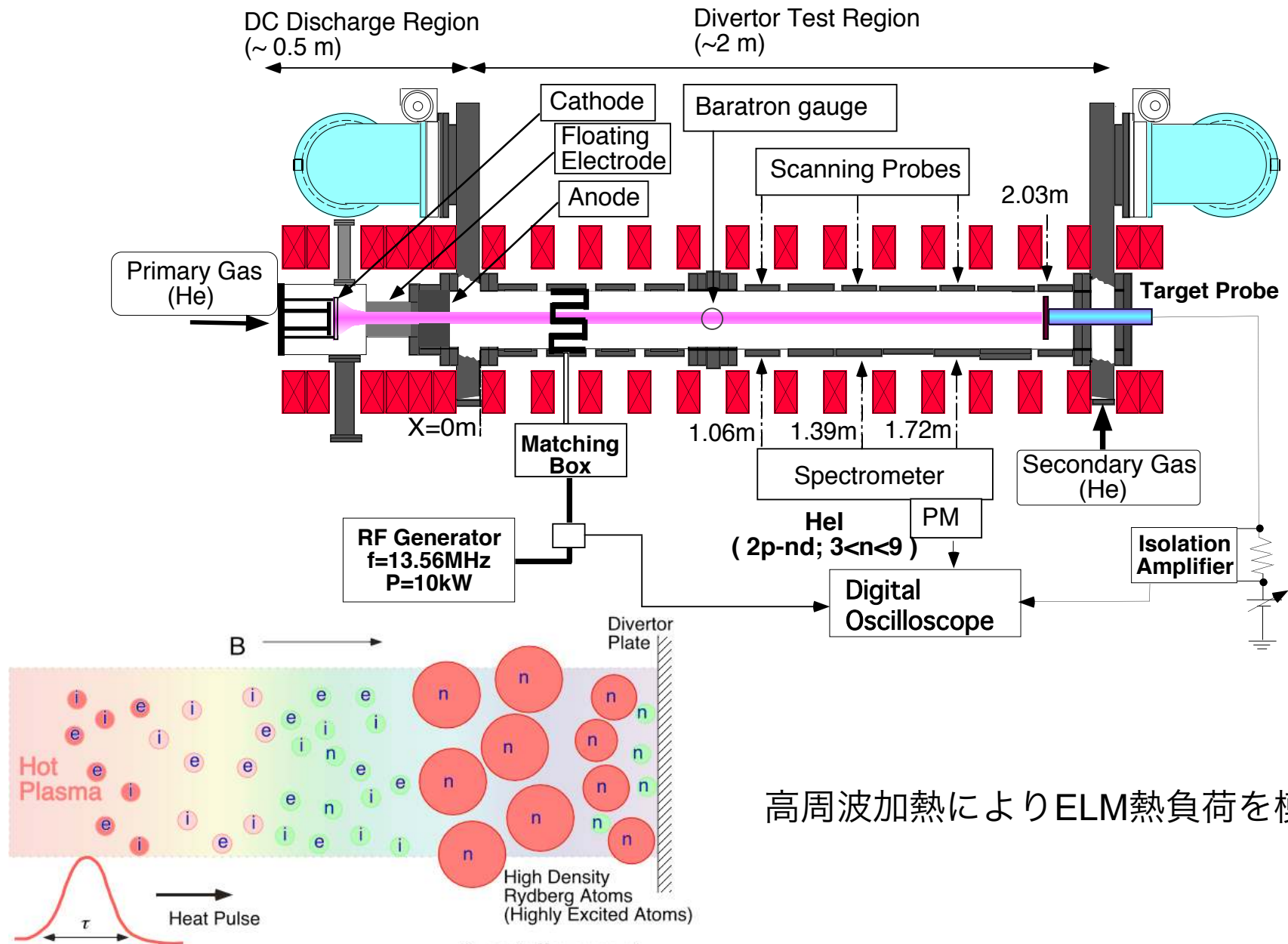
非接触プラズマと ELM の相互作用 (トカマク実験)

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

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

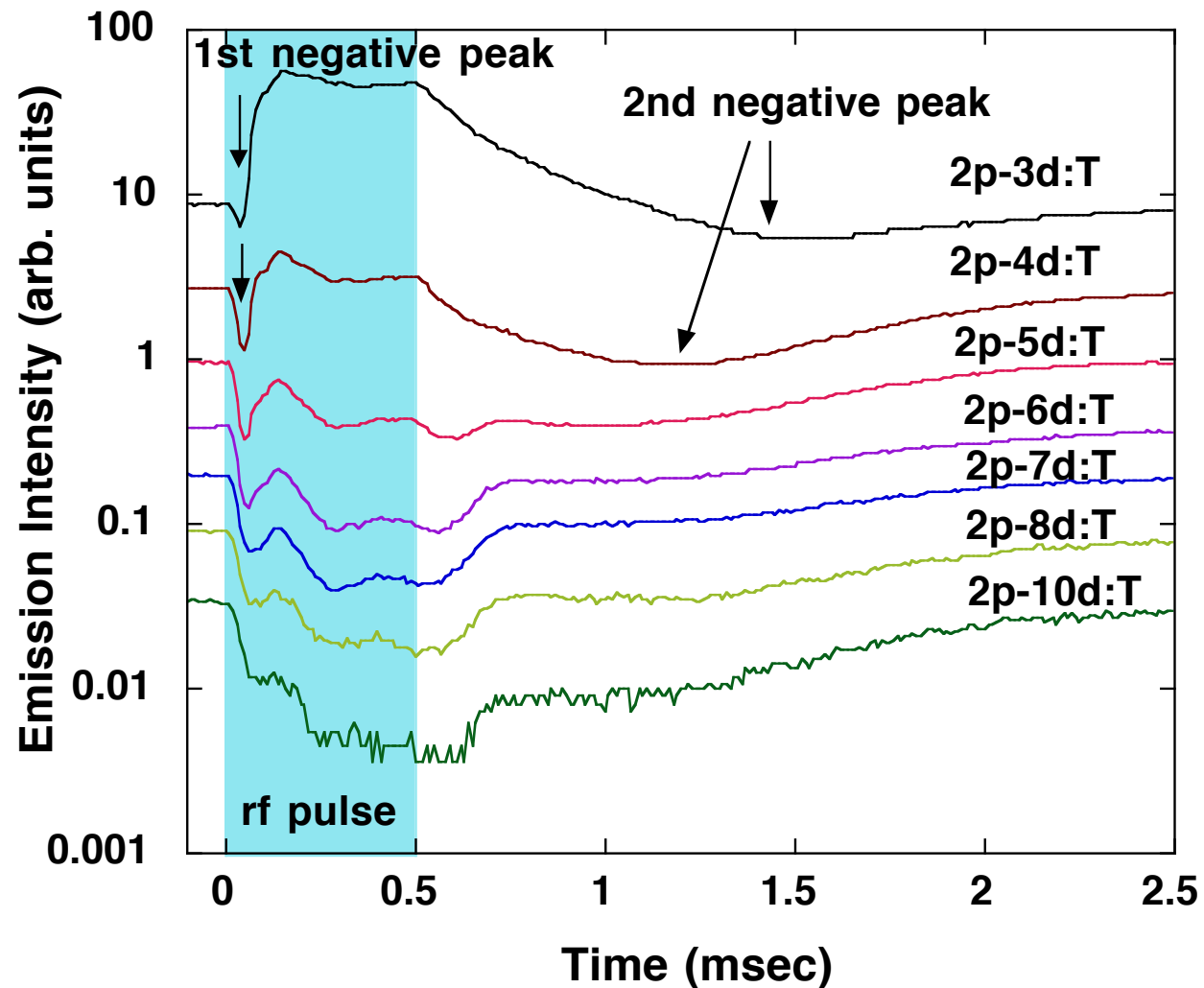


ELM熱負荷模擬実験



高周波加熱によりELM熱負荷を模擬

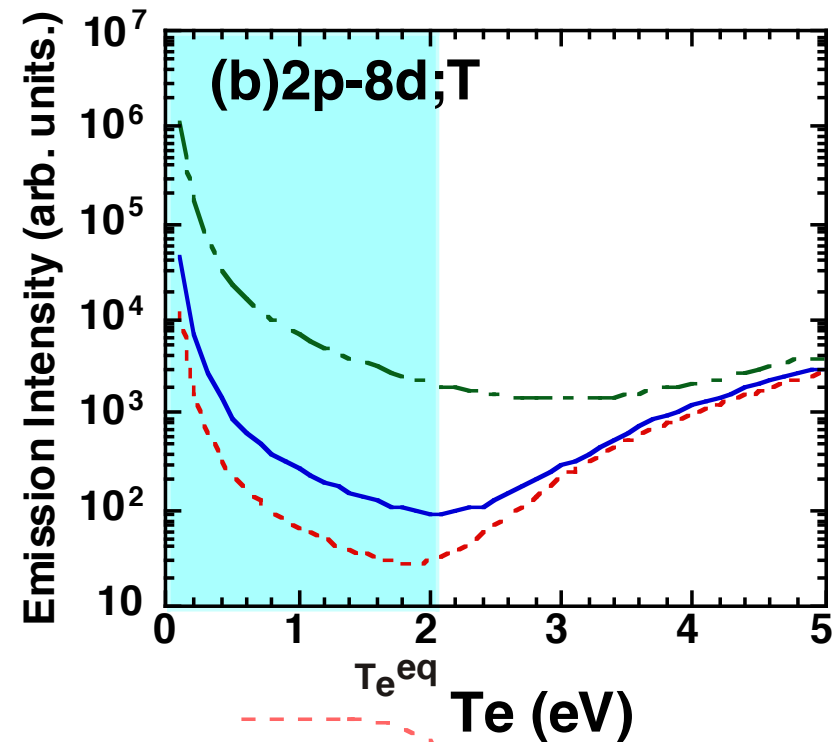
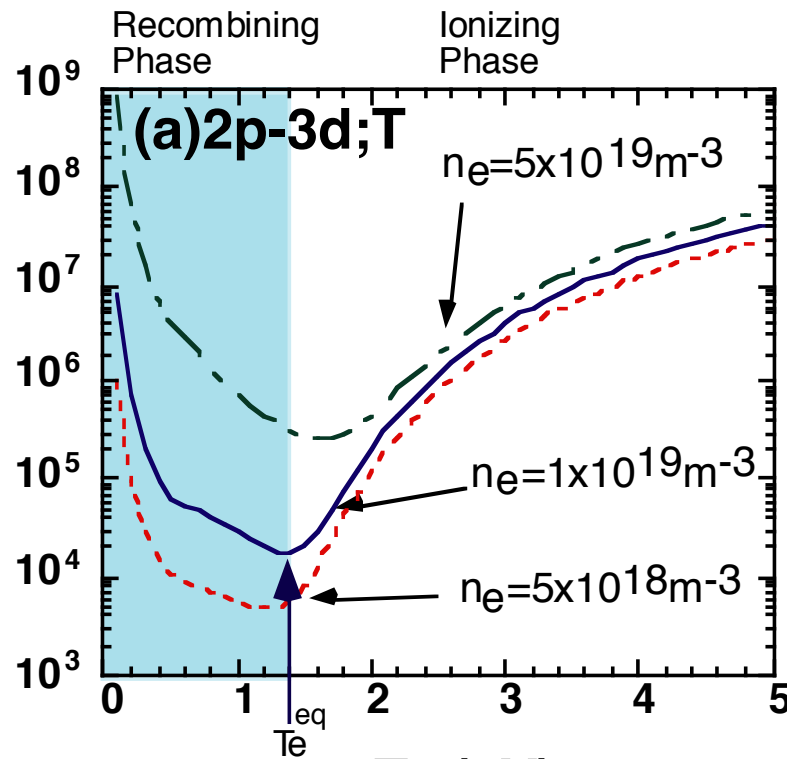
非接触プラズマへの熱パルス印加実験



■ Time evolution of Balmer series spectra at $P \sim 9$ mtorr

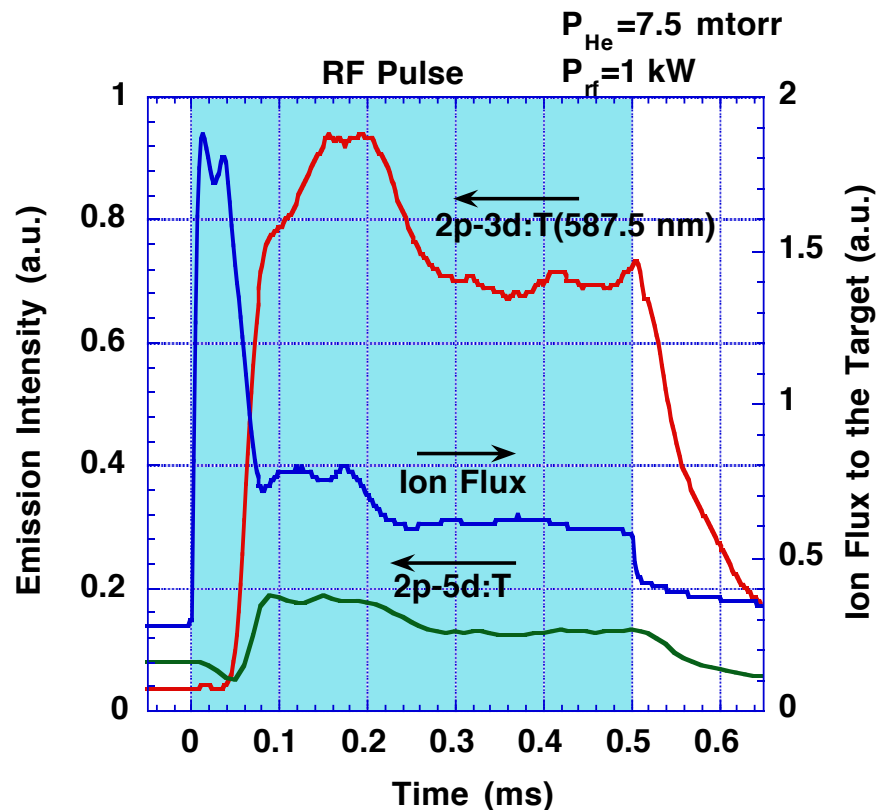
■ Negative spikes appear

衝突輻射モデルによるNegative Spikeの解析



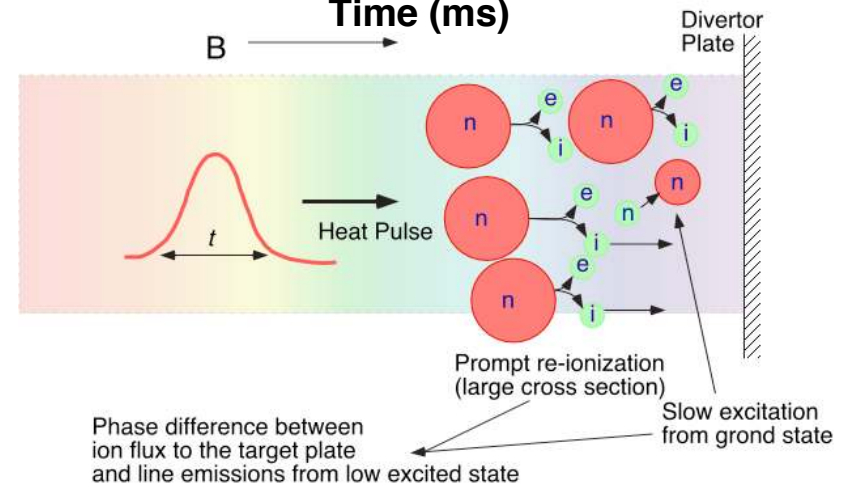
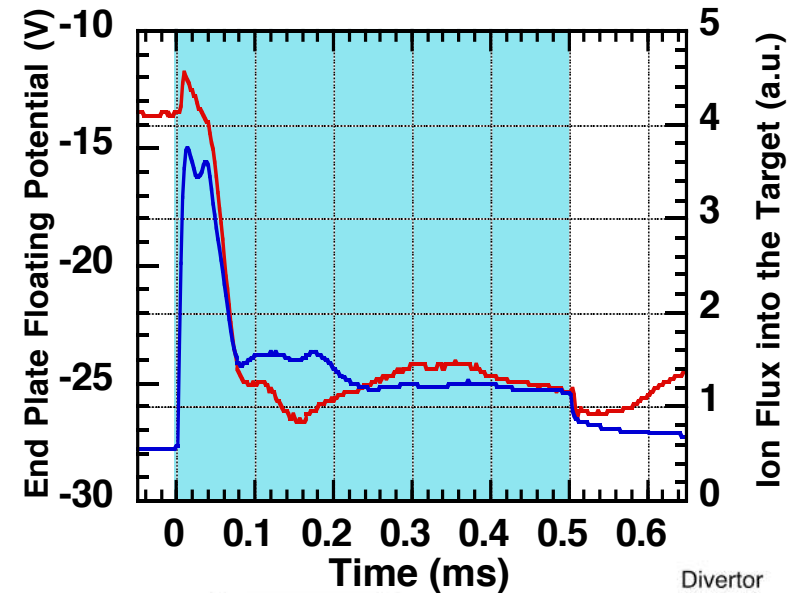
Transition between the ionizing phase and recombining phase gives minimum points

1st Negative Spikeの詳細観測



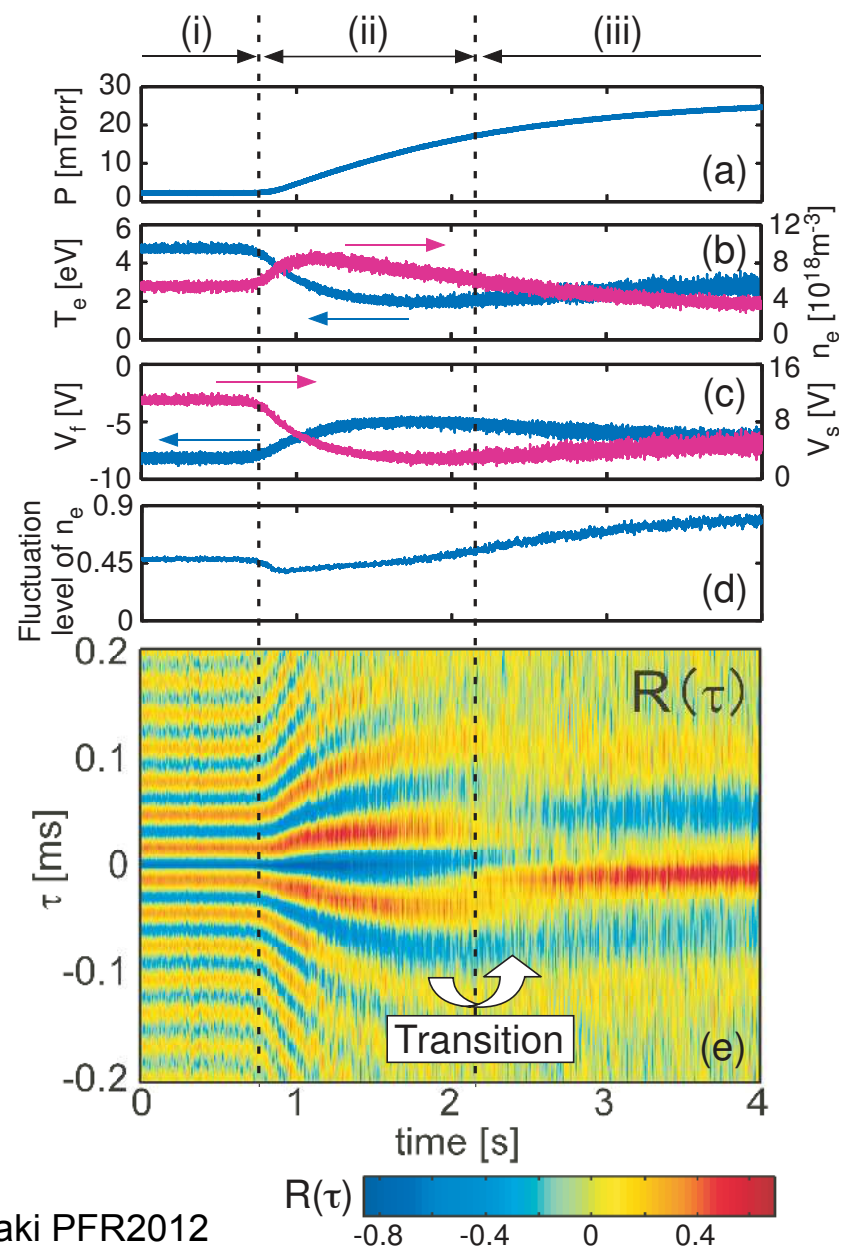
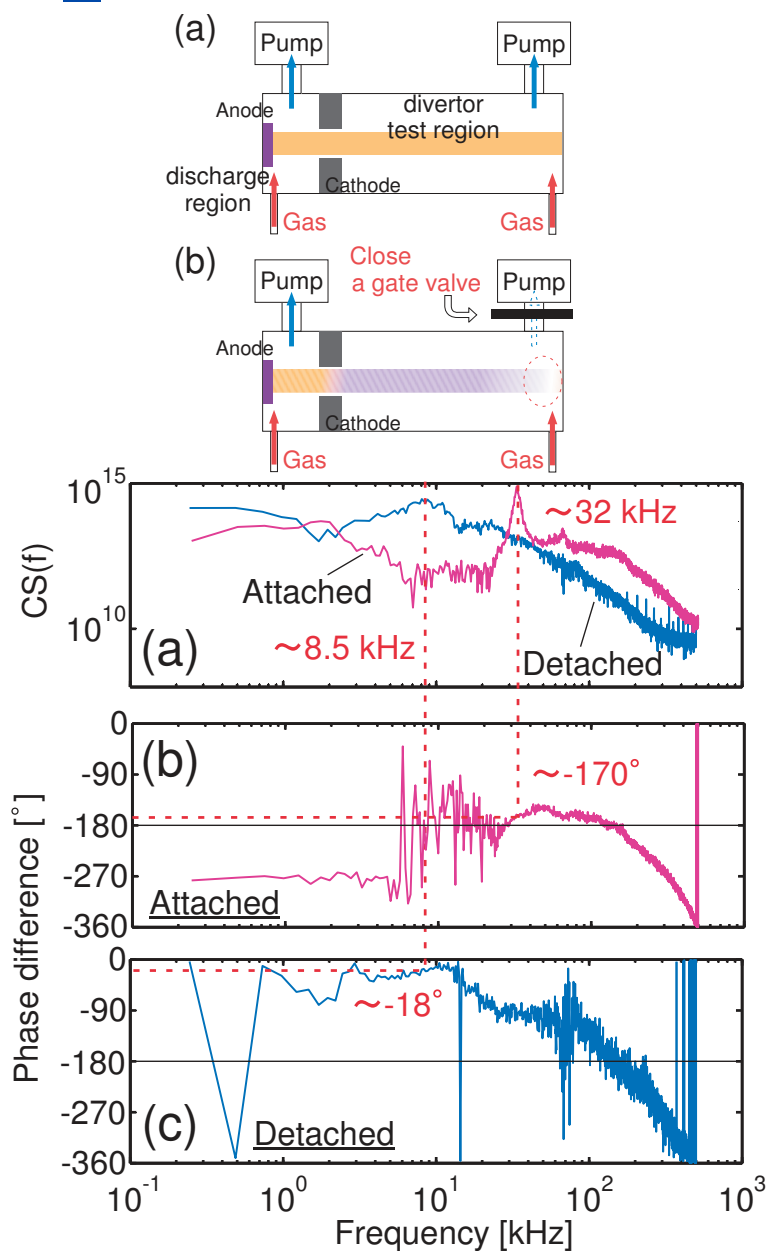
- Ion flux to the target plate is substantially increased near the 1st negative spike.

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





接触—非接触プラズマ遷移



非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合 (水素、炭化水素)

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性 (門先生)

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象 (Plasma Blobs) (田中先生)

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果 (部分非接触)

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定-コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場 (磁気島) (増崎先生)

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 -ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

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 → 不純物発生の増加

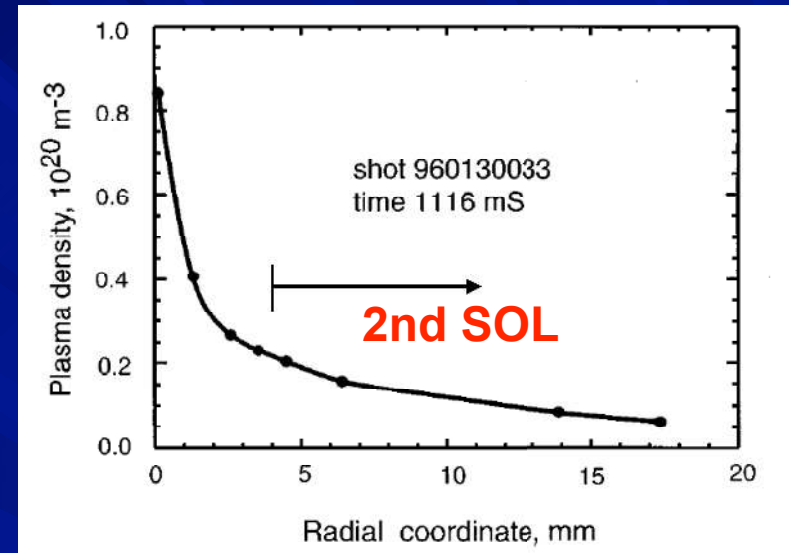
径方向拡散によるプラズマ輸送のみでは説明が困難

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

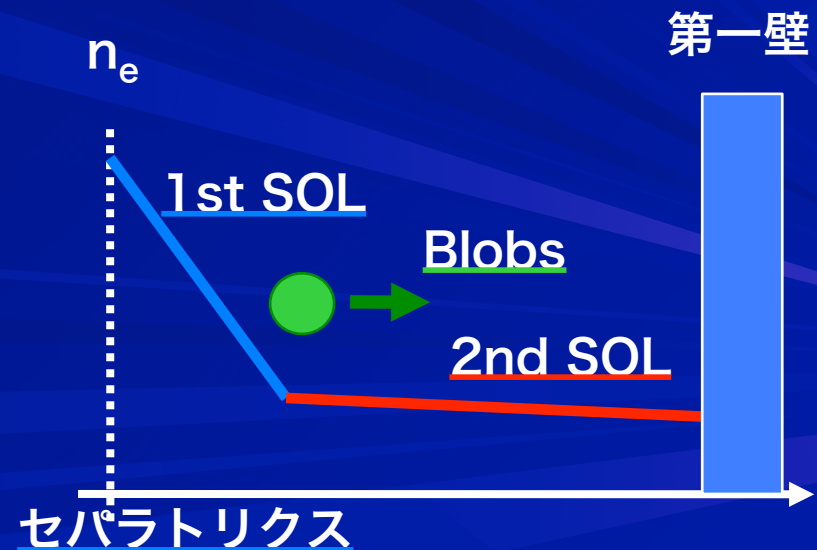
磁力線を横切る対流的プラズマ輸送？

→ **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

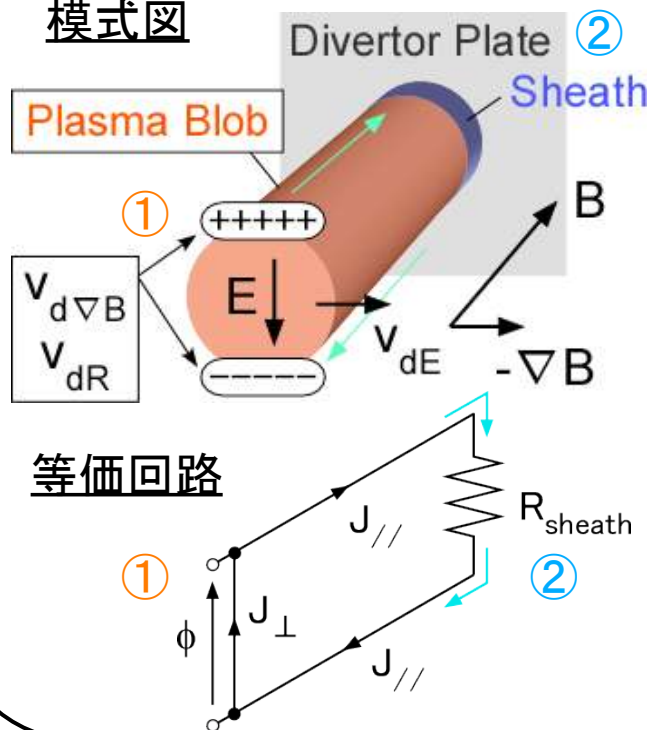


M. V. Umansky et al. Phys. Plasma 5, 3373(1998).



Plasma Blob輸送研究課題

模式図



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

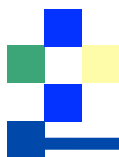
電場Eと磁場BのExBドリフトにより輸送

- ↓
- 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

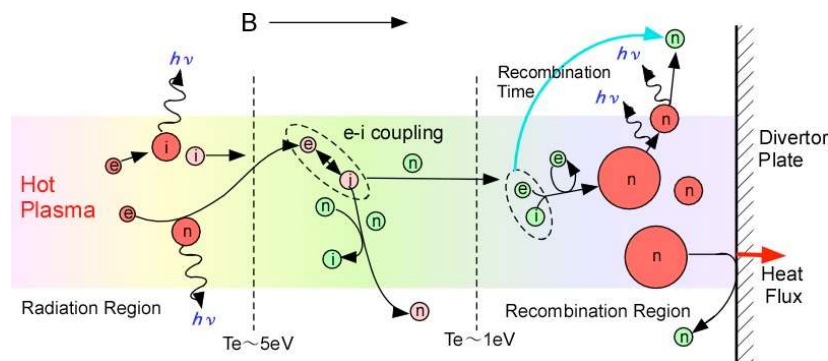
・・・輸送速度($\propto E$)・輸送距離に大きく影響

実験的な検証は不十分



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

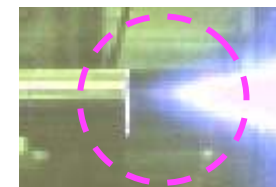


非接触プラズマの典型写真

接触



非接触



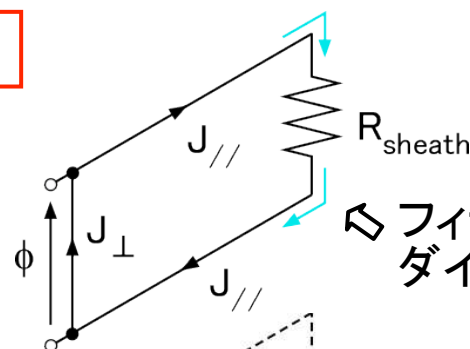
中性ガス圧P増加

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

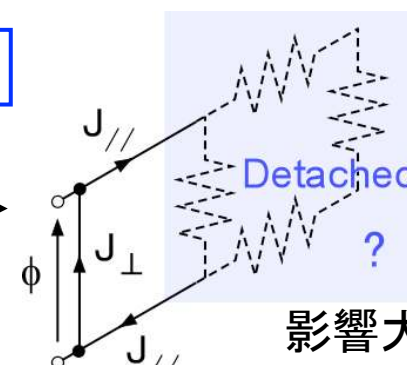
等価回路1

シース抵抗で分極保持



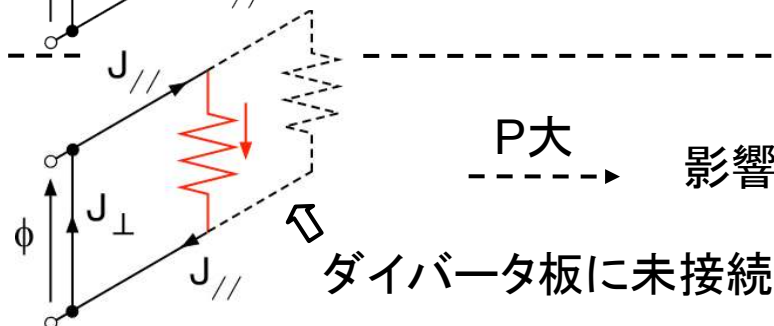
非接触状態時

P大



等価回路2

より上流で分極保持



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

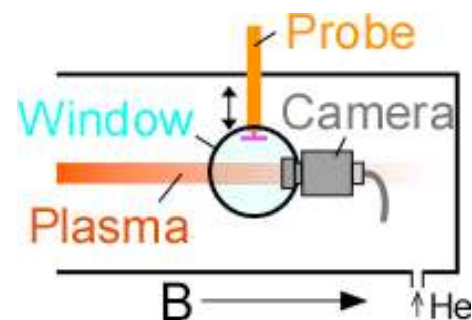
高速カメラ

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



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

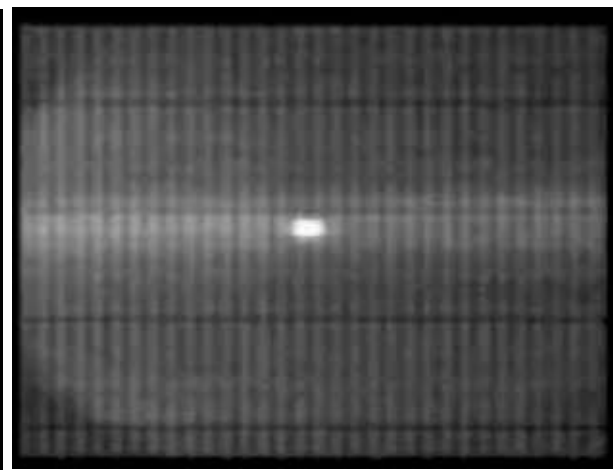
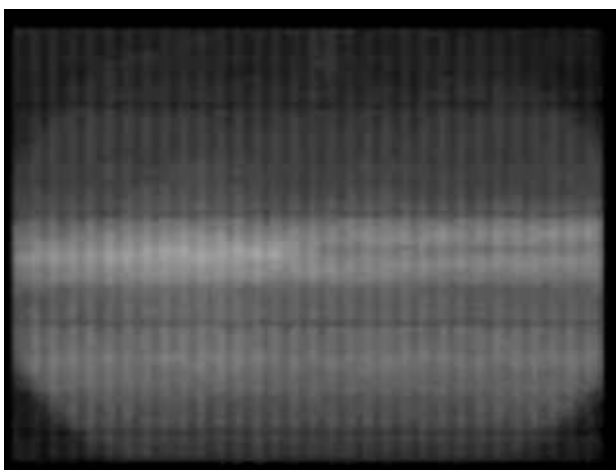
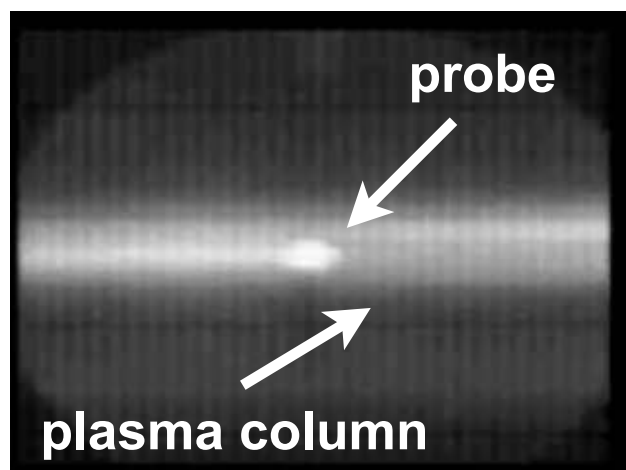
側面図

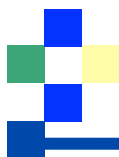


P=3.6mTorr

P=9.0mTorr

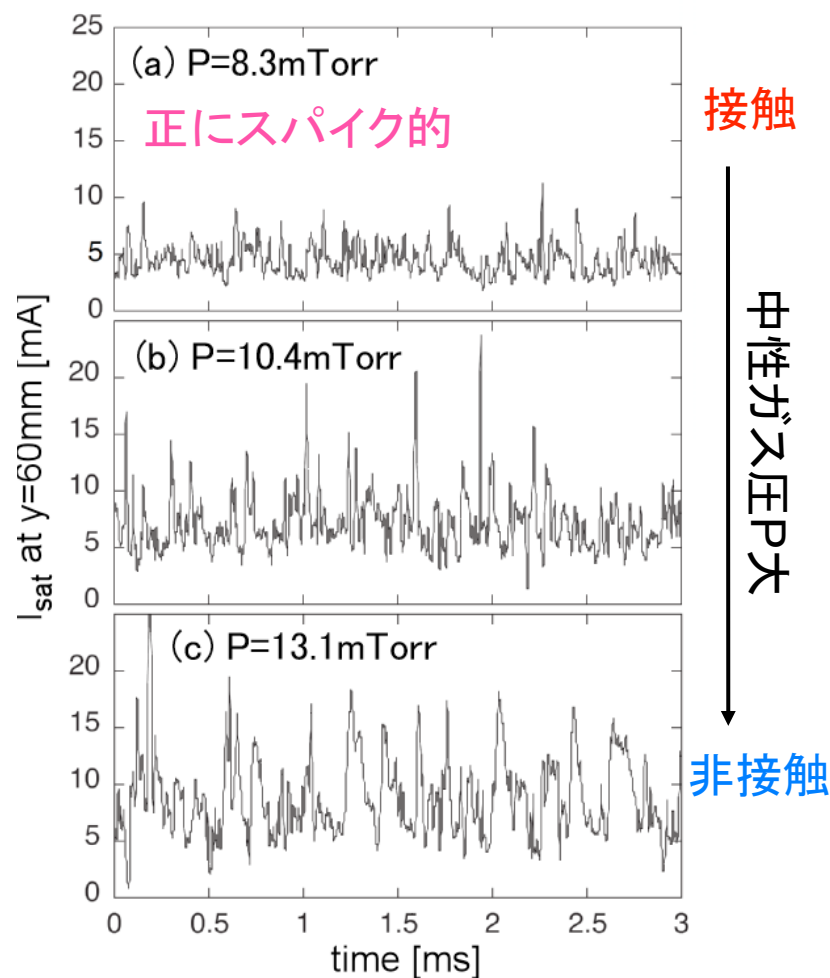
P=13.6mTorr





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



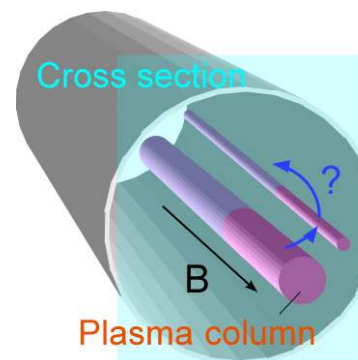
直線型装置を用いた接触・非接触状態時の静電揺動特性比較

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

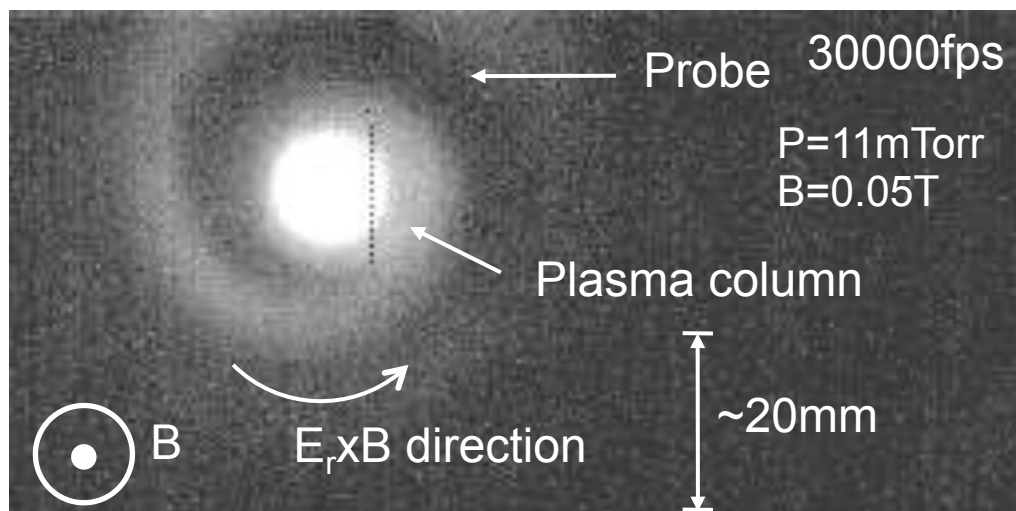


非接触プラズマ中のプラズマ発光の動的挙動

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

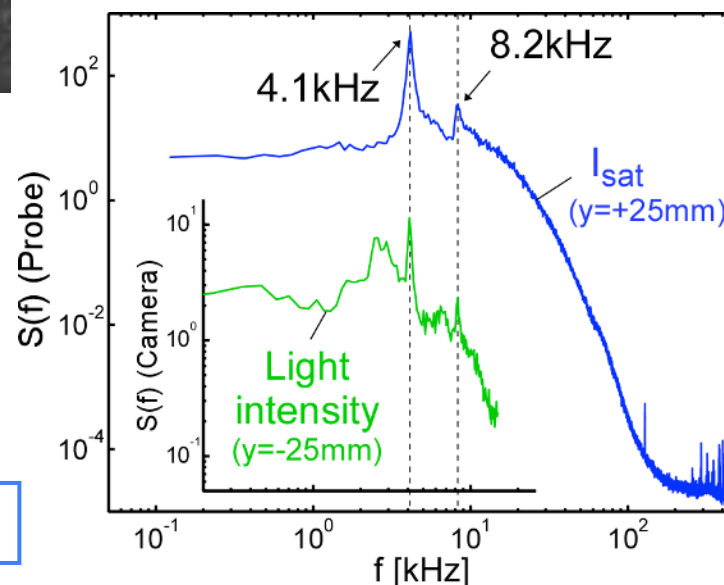
128x256pixel ($\sim 54 \times 108 \text{ mm}^2$)



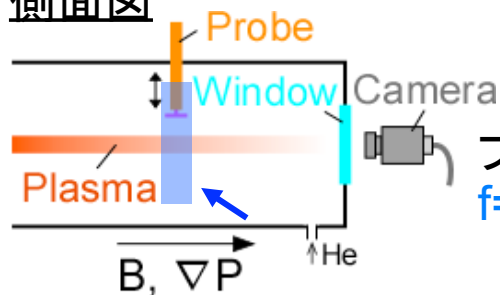
渦状のプラズマ発光の回転
を初めて観測

回転方向: $E \times B$ 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



プローブ・高速カメラともに
 $f=4.1 \text{ kHz}$, 8.2 kHz にピーク

焦点面内におけるプラズマ揺動を反映

非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

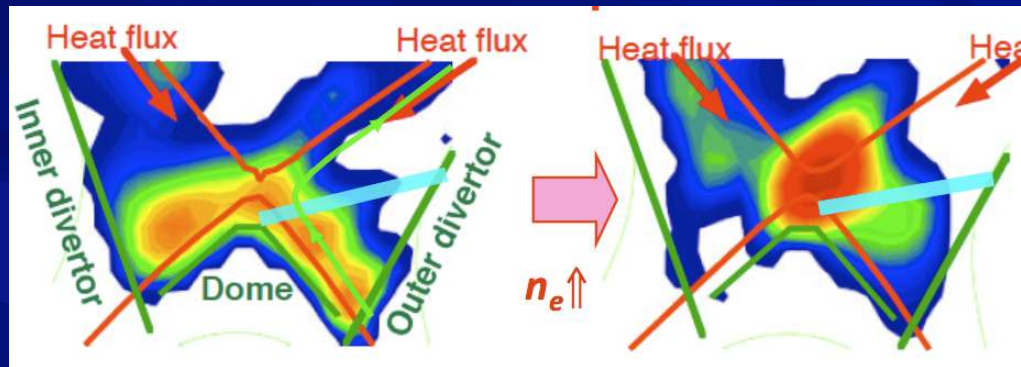
Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

熱的不安定性-X点MARFE

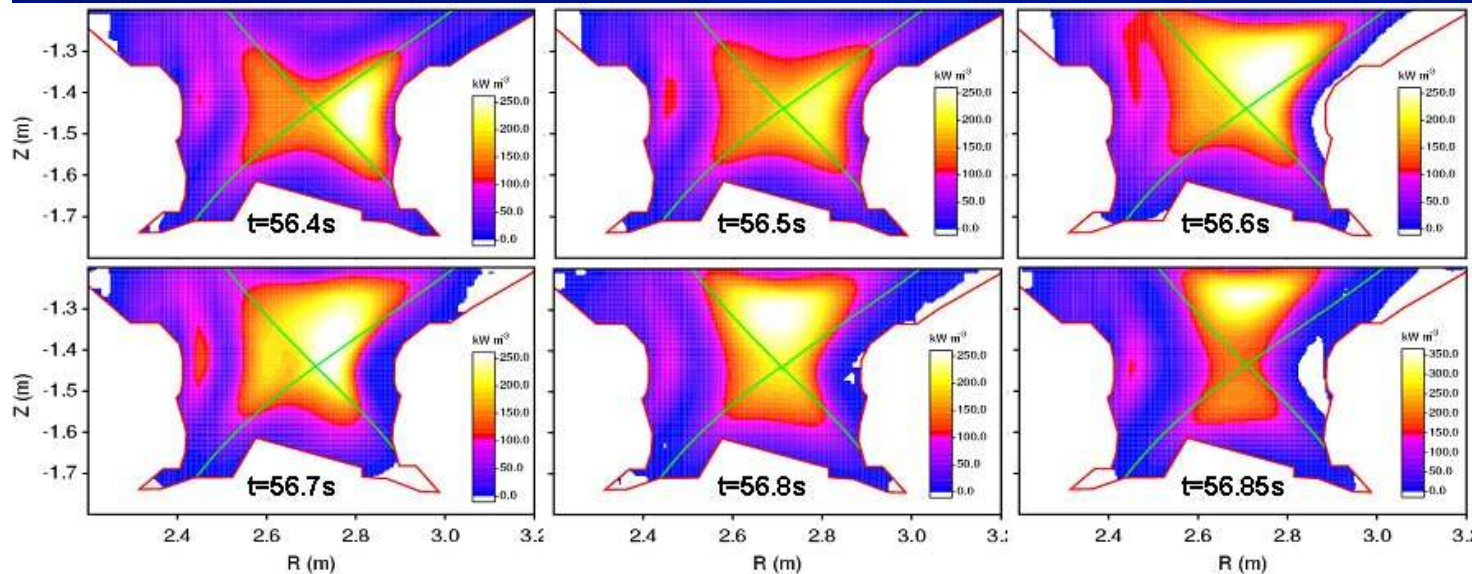
非接触プラズマは不安定→容易にX点MARFEに移行



N. Asakura et al. PSI18

X点MARFEによるコアプラズマ閉じ込め特性の劣化

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）



A. Huber et al,
NF (2007)

非接触プラズマの熱的不安定性(1次元解析)

NAGDIS, Nagoya Univ.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nv)}{\partial \xi} = n(v_{ion} - v_{rec}) + \frac{\Gamma_{\perp} H_{\perp}}{\Delta_{nv}}$$

$$\frac{\partial(nmv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} (2nT + nmv^2) = -nmv(v_{at} + v_{rec})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(3nT + \frac{1}{2} nmv^2 \right) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\kappa_0 T^{5/2} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{2} nmv^3 + 5nTv \right)$$

$$= -n^2 f_z L_z - \frac{3}{2} nT v_{at} - nE v_{ion} + \frac{Q_{\perp} H_{\perp}}{\Delta_E},$$

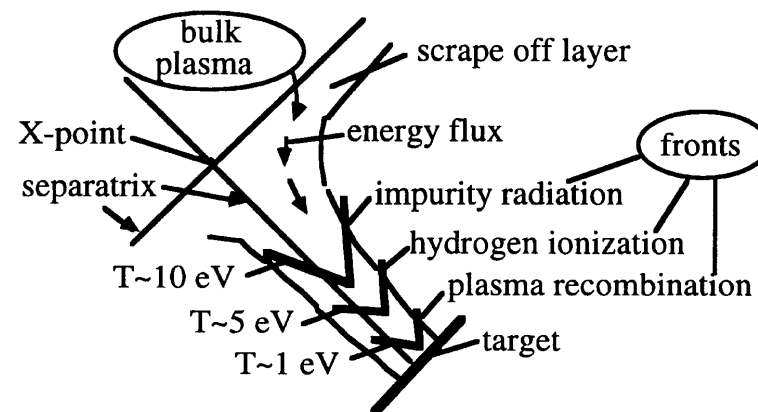
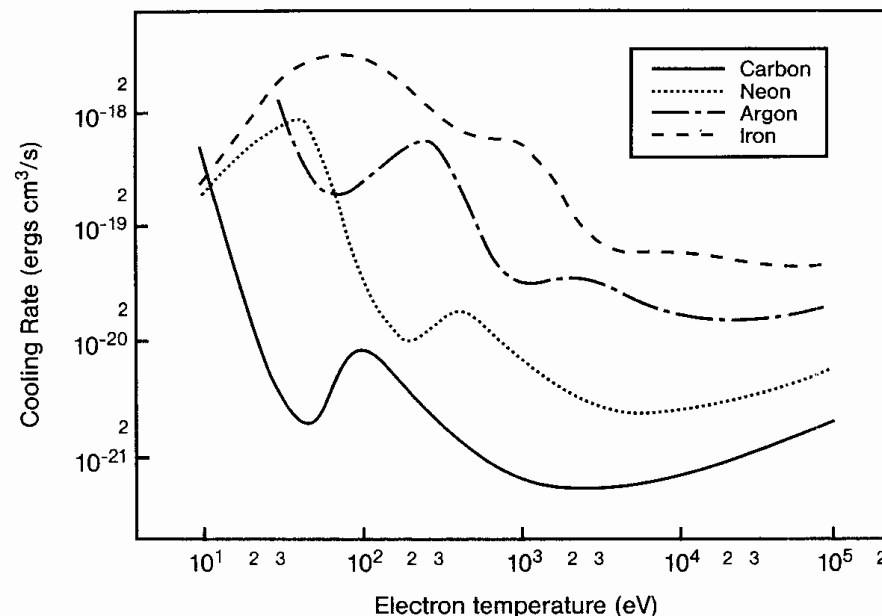
シース境界条件での解-高密度で不安定化
[Borris NF1997]

電離フロントのターゲット付近からX点近傍への移動 [Krashenninnikov JNM1999]

コアから流入する熱流の減少⇒非接触プラズマ構造の不安定化(動的解) Nakazawa PPFC2000 (シミュレーション)

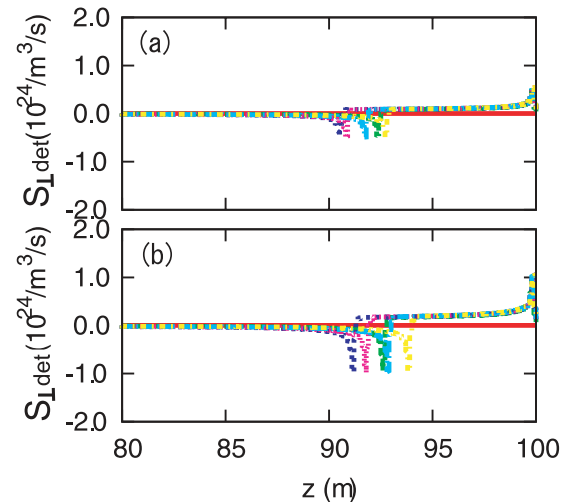
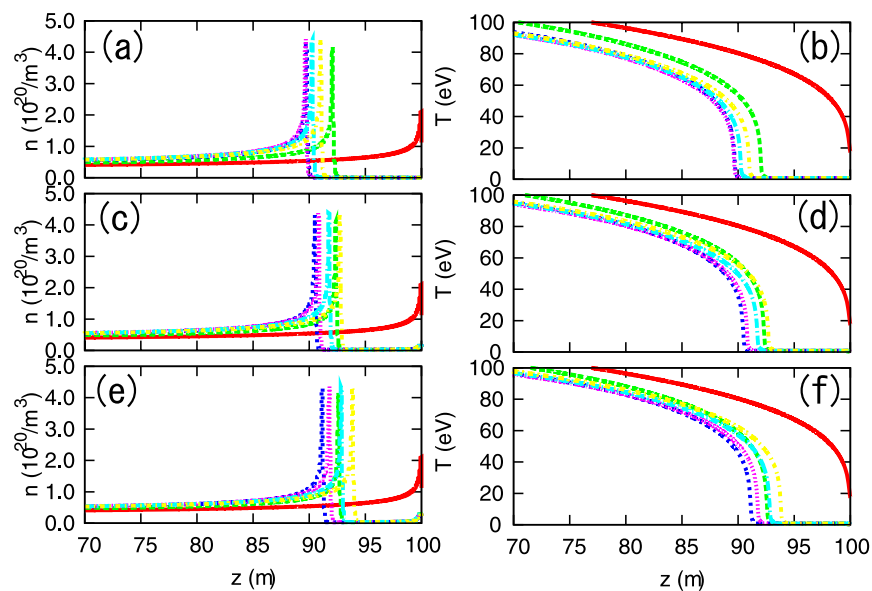
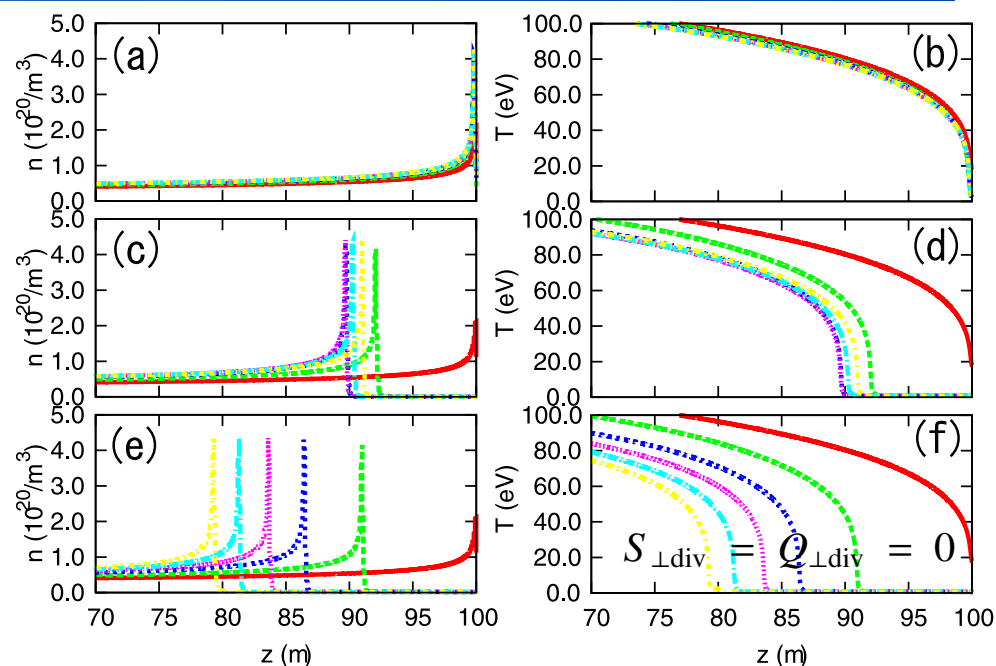
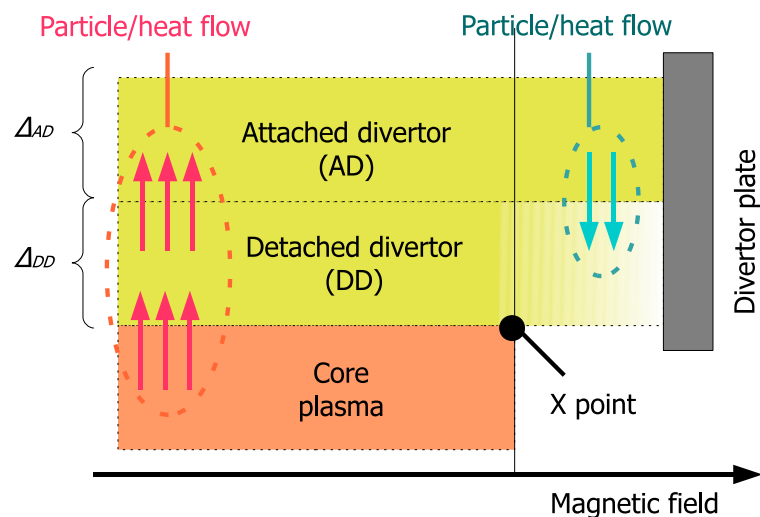
放射フロントの2D V shapeの影響⇒放射領域の拡大、径方向熱輸送の変化⇒2分岐解の存在

[Krashenninnikov PoP1997]





部分非接触ダイバータ構造による安定化



非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

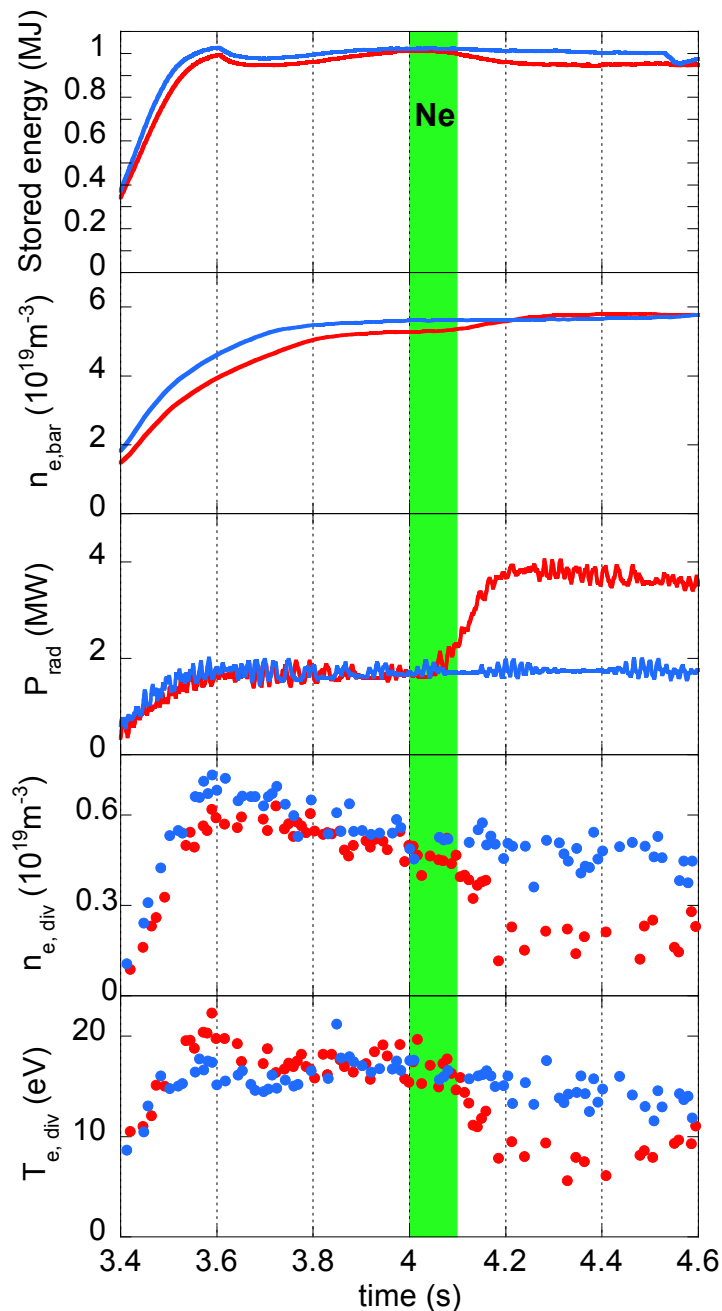
(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

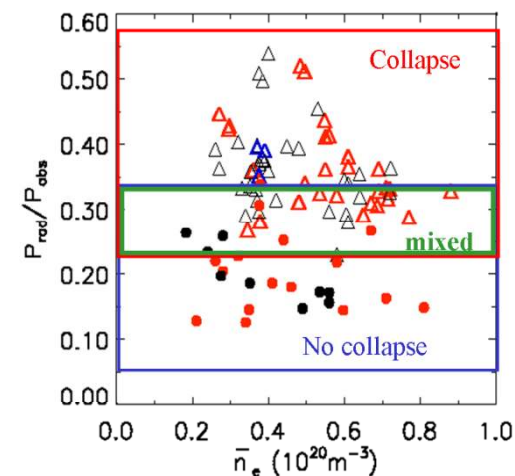
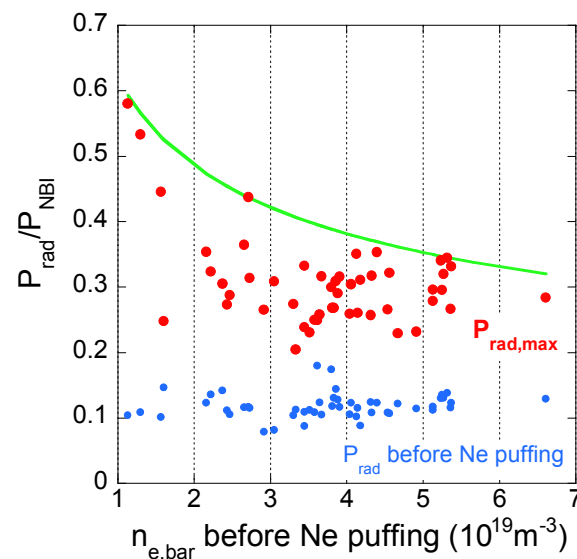
Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

2.1. ネオンを用いた放射損失増大と放射損失割合



ネオンパフによる放射損失増大

放射損失割合 $P_{\text{rad}}/P_{\text{NBI}}$ の密度依存性



Peterson et al., PFR 1 (2006) 045.

- 低密度: 放射損失割合は60%程度に及ぶ

低密度では不純物スクリーニング効果が小さいためにより深く不純物が侵入し、その結果、放射領域が大きくなり、放射量が増えると考えられる。

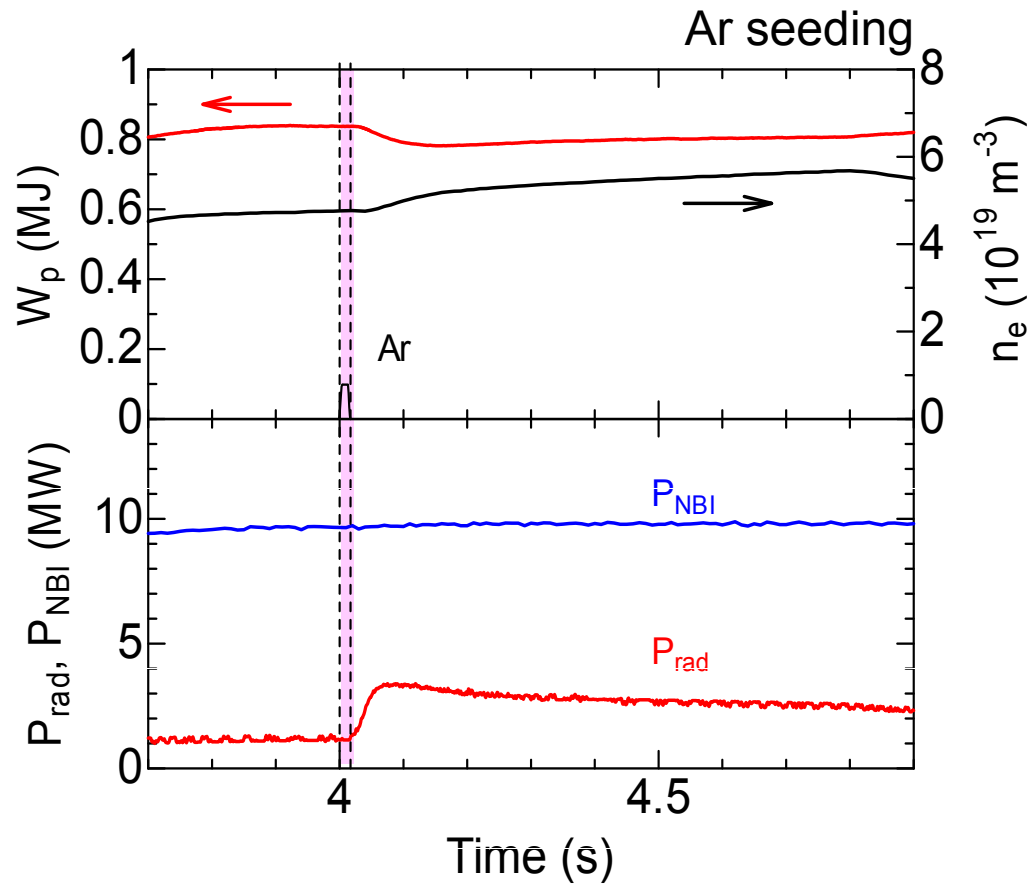
- 高密度: 放射損失割合は30%程度

水素のみの放電における放射崩壊時の放射損失と概ね等しい。



他の不純物ガス種で時間変化、放射割合はどうか？

2.2. アルゴンによる放射損失特性



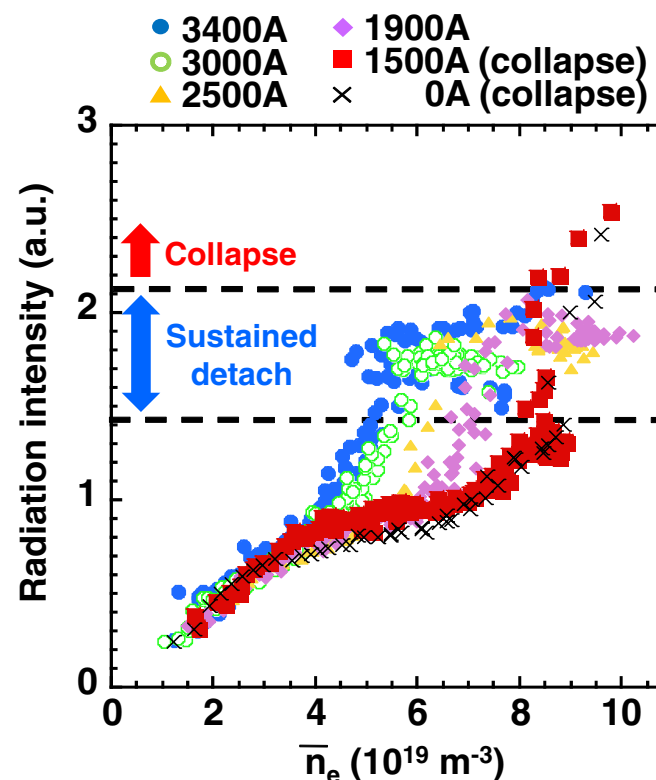
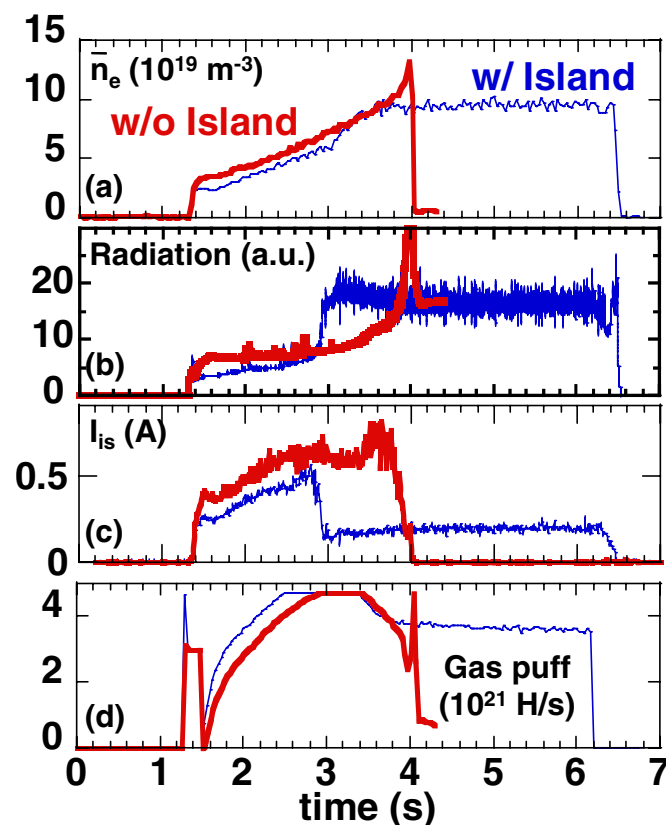
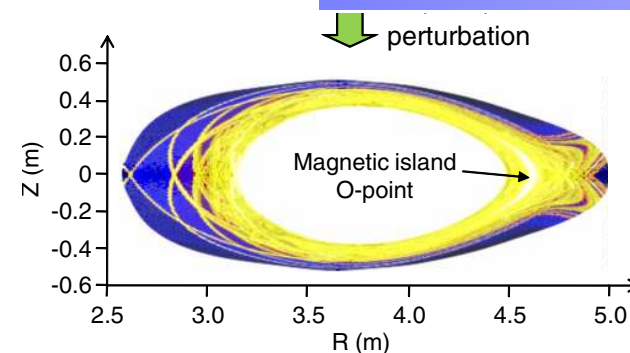
- ガスパフを切った後も高放射状態が続く。
- ガスパフによる中心線平均電子密度の増大、蓄積エネルギーの減少は、10%程度。
- 高密度領域での放射損失割合は30%程度。
- いずれも、グローバルにはネオンとほぼ同様な特性を示す。

共鳴摂動磁場を用いた非接触プラズマの制御

NAGDIS, Nagoya Univ.

LHDにおける放射領域の安定化

共鳴摂動磁場により、 $n/m=1/1$ の磁気島を
最外殻磁気面外側に生成



非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)

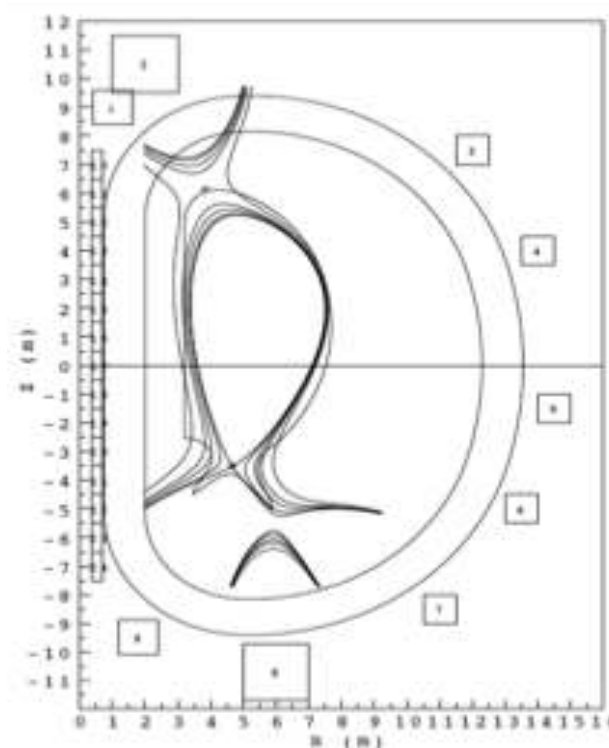
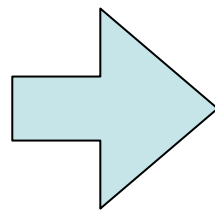
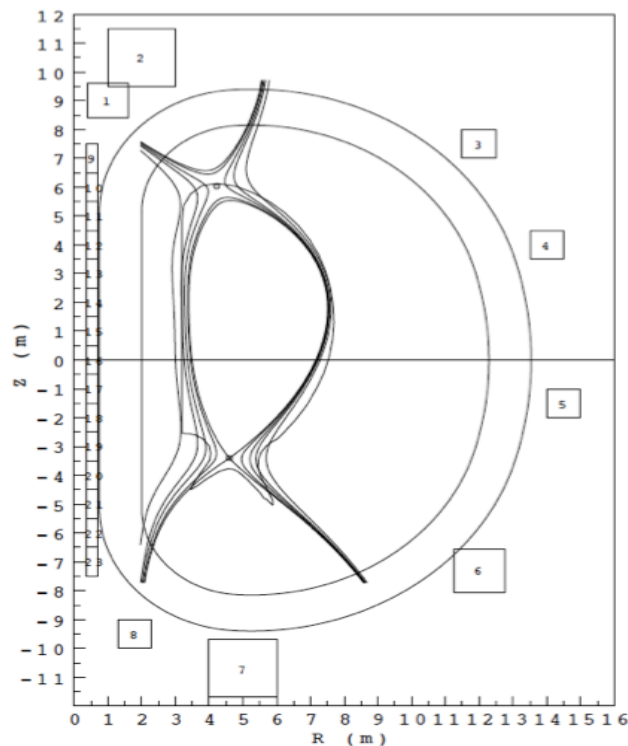
SlimCSでのSXDの検討

#垂直引き抜き方式と水平引き抜き方式について検討

#基本的なコイル位置は維持し、先進ダイバータの形成に不可欠と考えられるコイルの追加、位置変更のみで解析

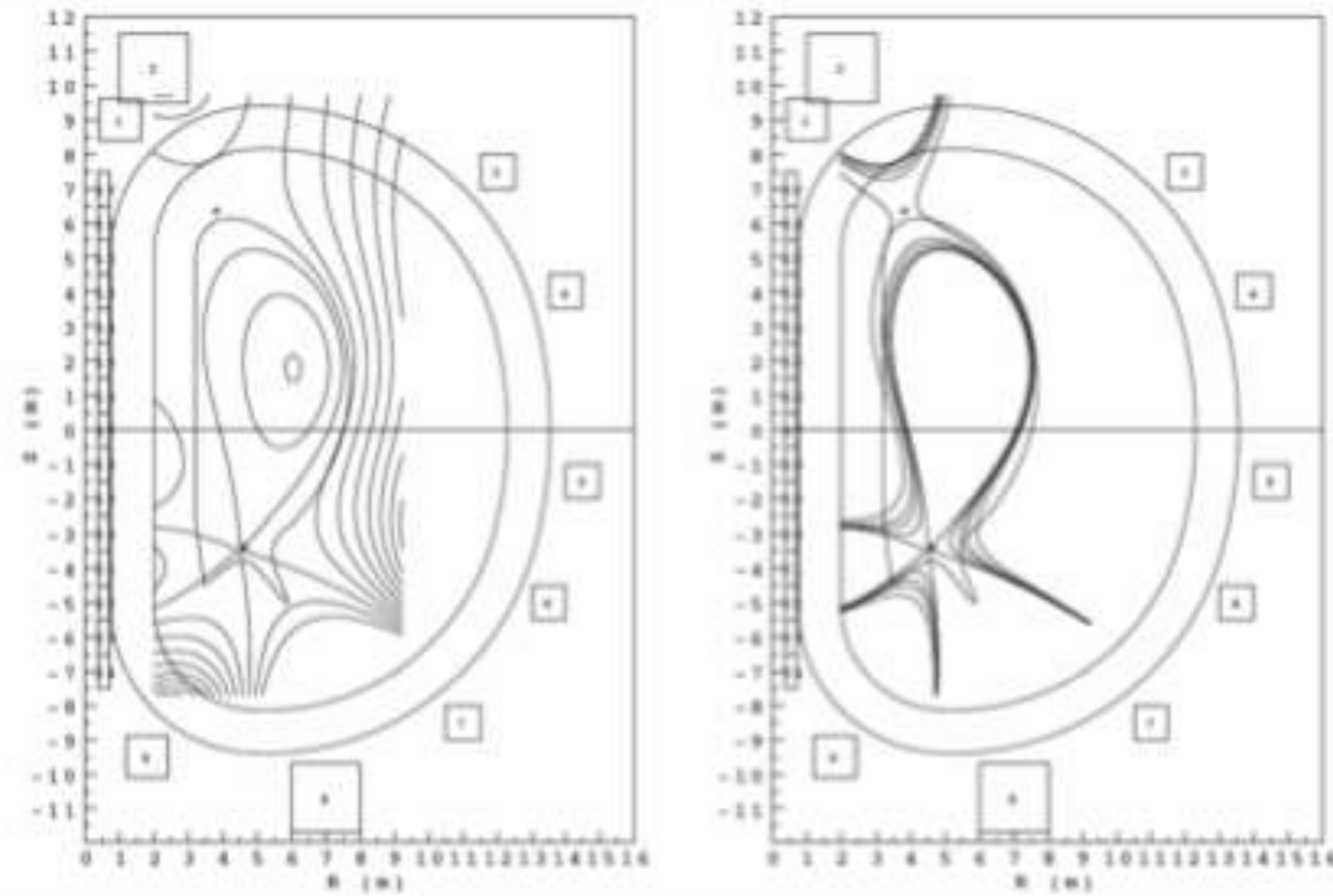
#装置下方にダイバータコイルを一基追加

$I_p=16.7\text{MA}$, $\beta_p=2.5$, $I_i=0.6$



fsxd=0.99

SlimCS でのスノーflakeダイバータ平衡の検討



(a) $I_c(21)=300\text{MAT}$, $I_c(20)=I_c(22)=50\text{MAT}$

Fig.3.1.3 No.21 コイルを更に低減した場合のスノーflakeダイバータ形成

中心ソレノイドのコイル(No.20, 21, 22)が、6 重極磁場形成に重要な役割を果たしている。

先進ダイバータへの適用に関する課題

先進ダイバータでの安定な非接触プラズマの生成は可能か

熱不安定性

磁場構造（エルゴディック領域の影響）

中性ガス（温度）の影響

径方向輸送（特にblob輸送）

NSTX snowflake experiment

(V.A. Soukhanowski, USBPO E-News, #42, p. 3, 2010; V.A. Soukhanowski et al, PSI poster P1-28, Monday 24 May 2010)

Heat flux reduction by a factor of ~ 3

Easier detachment (no need in gas puff)

Carbon content in the core down by a factor ~ 2

Radiation from the core down by a factor ~ 2

Radiation from divertor up by a factor of a few

No noticeable adverse effect on core plasma density and temperature

非接触プラズマにおける課題

(1) 原子・分子過程

電子-イオン再結合、分子活性化再結合（水素、炭化水素）

(2) 非接触プラズマ計測

プローブ計測の異常性（門先生）

(3) 非接触プラズマのエネルギーバランスの理解

中性ガス温度の影響、輻射輸送の影響

(4) 非接触プラズマの動的応答

ELM様熱負荷への応答、接触-非接触-再接触遷移過程

(5) 非接触プラズマ中の径方向輸送

非拡散的輸送現象（Plasma Blobs）（田中先生）

(6) 非接触プラズマの安定性

熱的不安定性、2次元効果（部分非接触）

(7) 金属壁での非接触プラズマ生成

適切な不純物ガスの選定—コアプラズマとの共存

(8) 非接触プラズマの制御手法の確立

Puff&Pump, エルゴディック磁場（磁気島）（増崎先生）

(9) 先進ダイバータ配位への適用性 —ダイバータ幾何学構造への依存性

Super-X, Snow flake, Isolated divertor etc.

NAGDIS
MAP-II
TPD

Gamma10
LHD
JT-60U(SA)