

平成26年8月1日
ダイバータ及びPWI合同研究会
於：筑波大学

LHDにおける ダイバータ・3D磁場輸送研究

LHDダイバータ・周辺プラズマ実験テーマグループ
増崎 貴

本テーマグループが2013年実験で取り組んだ課題

閉構造ダイバータを用いた周辺粒子制御

(課題) 粒子制御によりプラズマを高性能化し、ダイバータ排気特性の評価、及び粒子バランスの理解を得る

- ・ クライオポンプ排気効果の評価
- ・ 粒子バランス評価

放射冷却ダイバータ運転【今回の主な報告】

(課題) 最適条件の探査とエネルギーバランスの定量評価、放射・分光計測の拡充

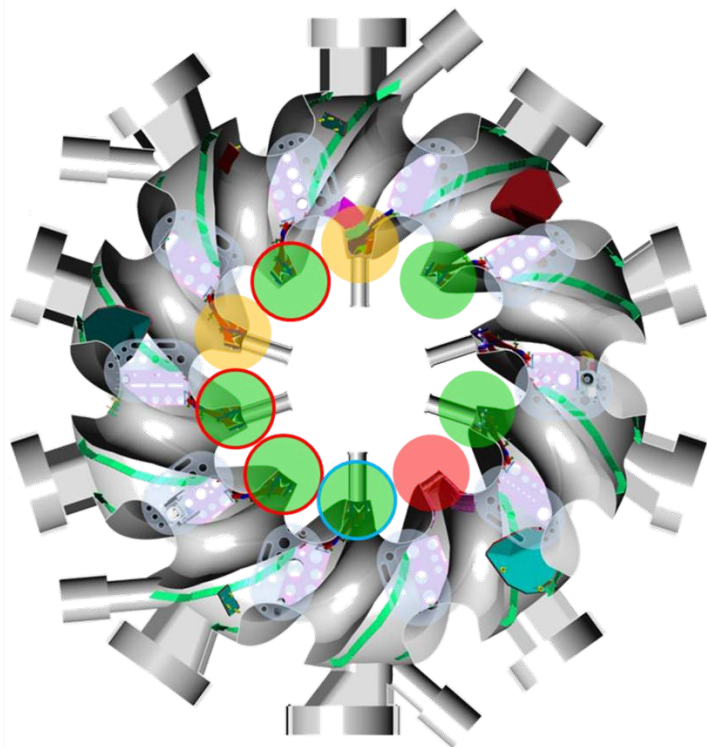
- ・ 不純物パフによるデタッチメント
- ・ ECHによる完全デタッチメント実験
- ・ 高ベータプラズマでのデタッチメント実験
- ・ デタッチメントのIRVB計測
- ・ 摂動磁場によるデタッチメント安定保持機構の解明
- ・ 高Zイオンを用いたデタッチメント

周辺プラズマ中における粒子・不純物輸送の物理機構の解明

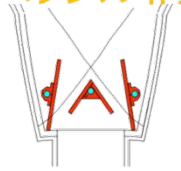
(課題) 周辺プラズマの詳細計測や新規解析手法を取り入れ、粒子・不純物輸送を評価する

- ・ Core Density Collapse (CDC: コア密度崩壊現象) を利用した周辺粒子輸送
- ・ 周辺ヘリウム輸送実験(九州東海大)
- ・ ダストの3次元軌跡
- ・ 高速掃引プローブを用いた静電揺動計測
- ・ 放射崩壊機構
- ・ ストキャスティック領域の不純物輸送
- ・ ヘリウムビームプローブによる周辺計測
- ・ 固体水素ペレットによる高密度準定常維持

閉ダイバータの現状と予定

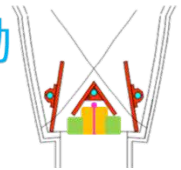


- **2010年** 排気装置を備えない試験的なバップル構造の設置（トロイダル2セクション）



- **2012年**

- 排気装置を備えた閉構造ダイバータの設置（トロイダル6セクション）
- トロイダル1セクションの排気装置を稼働



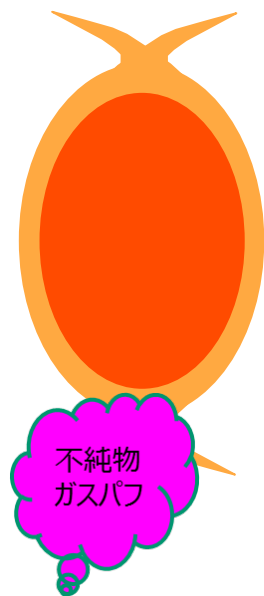
- **2013年**

- 排気装置を備えた閉構造ダイバータの設置（トロイダル1セクション、NBI対向面を兼ねる）
- 新たにトロイダル3セクションの排気装置を稼働

- **2014年**

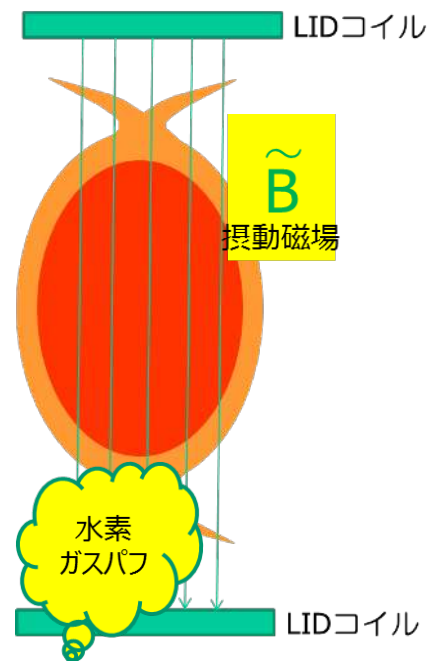
- 排気速度改善のため、クライオポンプ試験体を用いた排気速度試験を行っている。
- 第18サイクルに向けて、1セクションに改良型クライオポンプを設置予定。

LHDにおける3つの放射冷却ダイバータ実験手法



✓ 不純物ガスパフ

- ・低密度から高密度まで
- ・主プラズマへの不純物混入
- ・磁場配位依存性



✓ 撮動磁場印加による磁気島形成 (磁気島デタッチ)

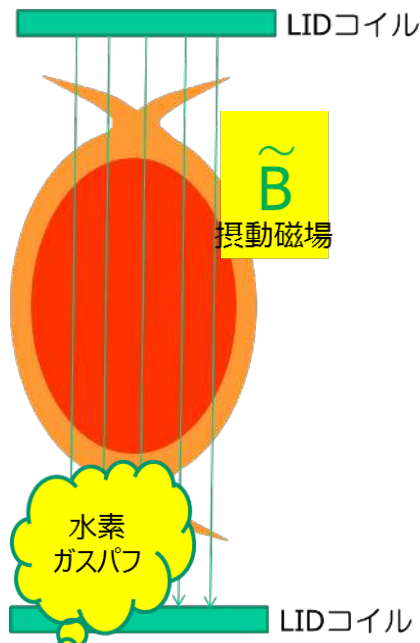
- ・高密度 ($>5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)
- ・磁気島サイズ依存性
- ・磁場配位依存性



✓ サーパンスモード

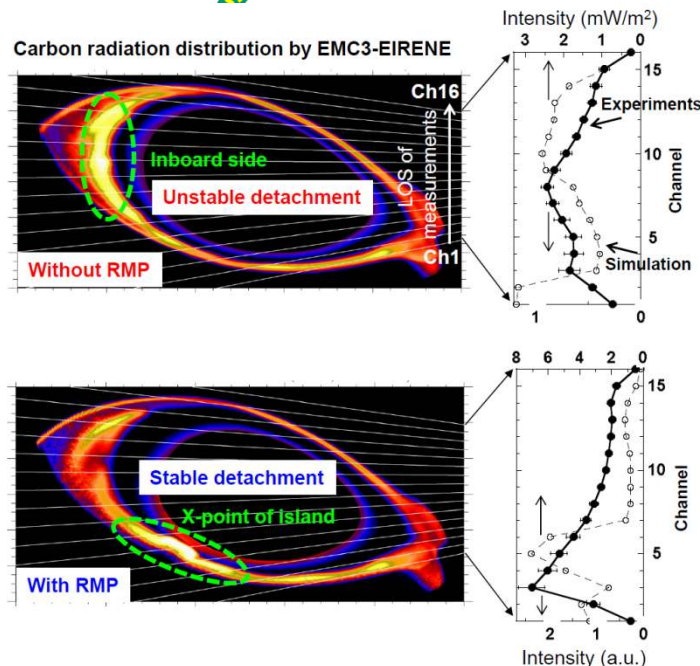
- ・磁場配位依存性
 - ・周辺加熱で閉じ込め劣化
- ⇒ ECH中心加熱による完全デタッチメント (17サイクルに確立)

いずれも局所的なダイバータデタッチメントではなく、上流(周辺プラズマ)から変化放射損失増大→ダイバータ熱・粒子負荷減少(デタッチメント)



磁気島デタッチメントの課題

- ✓ 放射損失の増大 (現状30%⇒80-90%)
- ✓ 放射領域の同定とその時間発展
- ✓ トロイダル異方性
- ✓ 安定化機構の解明

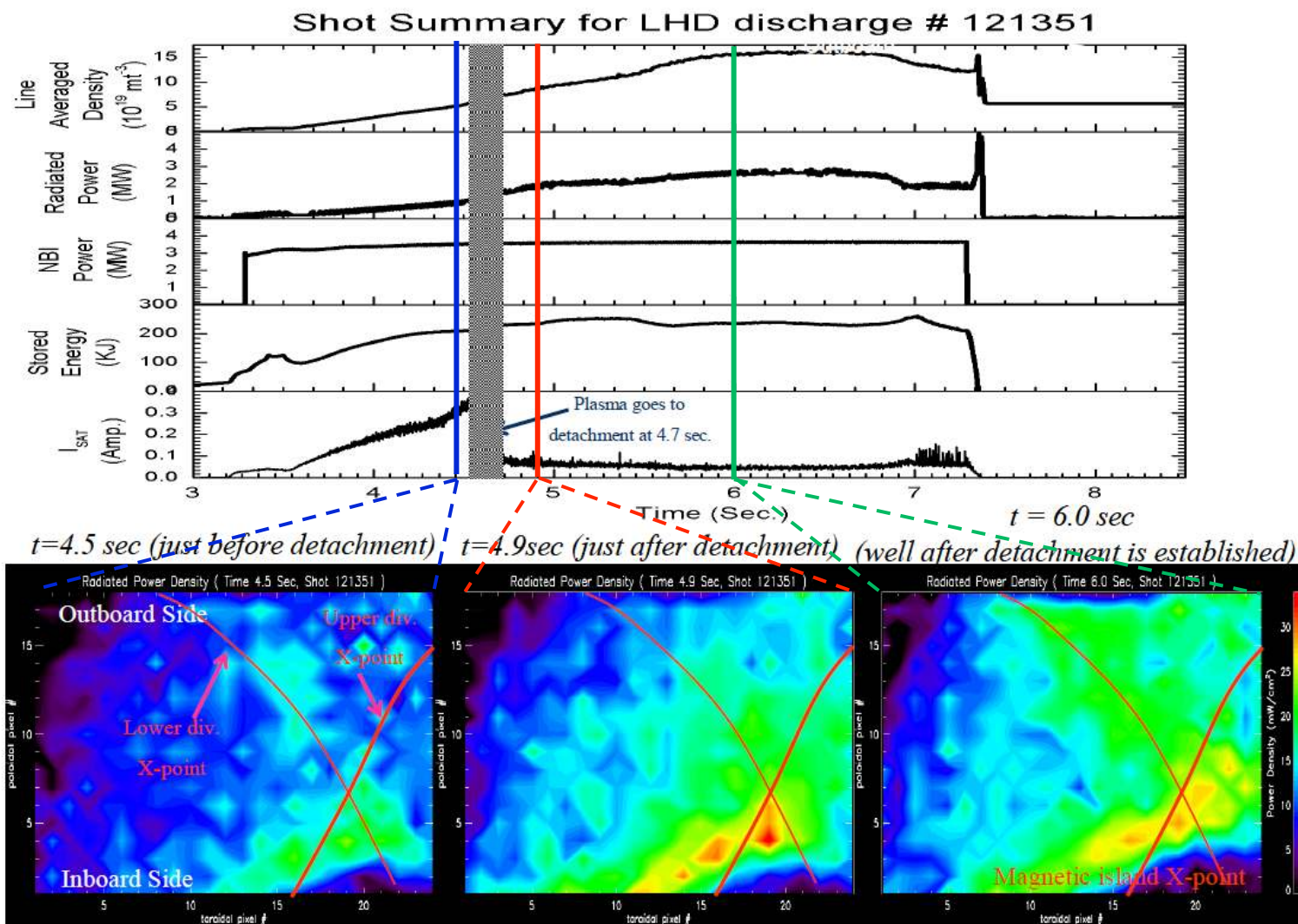


第17サイクルでの試み

- ✓ ダイバータ領域の分光計測
- ✓ 放射領域の同定
- ✓ トロイダル異方性の観測と磁場配位との関連の考察
- ✓ 摂動磁場印加による安定化機構の考察

放射領域の同定

Experiment shows radiation localization near island X-points as detachment occurs



デタッチ時、磁気島のX点で放射が増大(局所化)。

放射領域の同定 シミュレーションとの比較

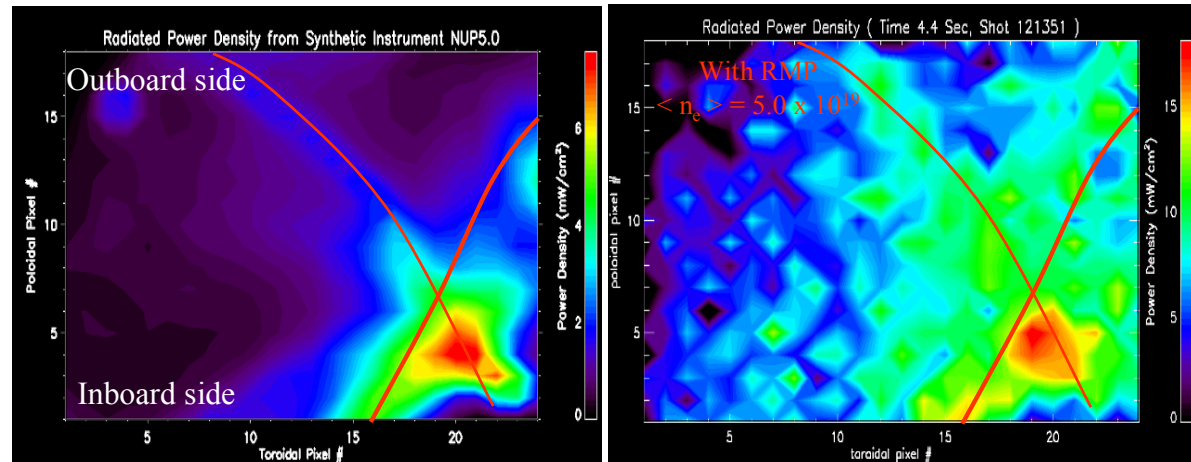
Modeling and Experiment – a comparison

General observations

Carbon radiation from modeling Plasma radiation from Experiment

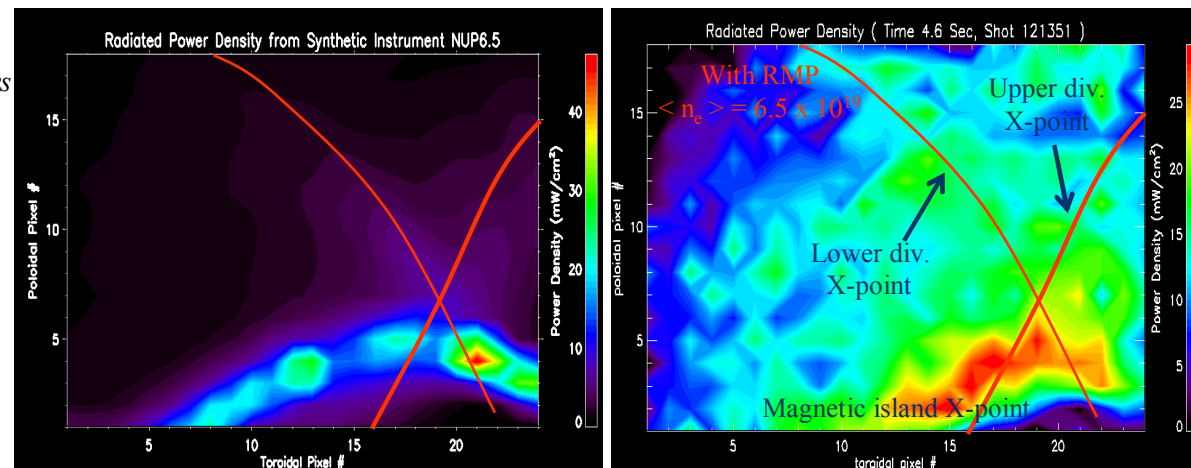
Before Detachment

- Modeling and experiment – radiation along lower and upper divertor X-point
- Power densities from experiment are higher ~ 2.5 times
- Overall a good qualitative match



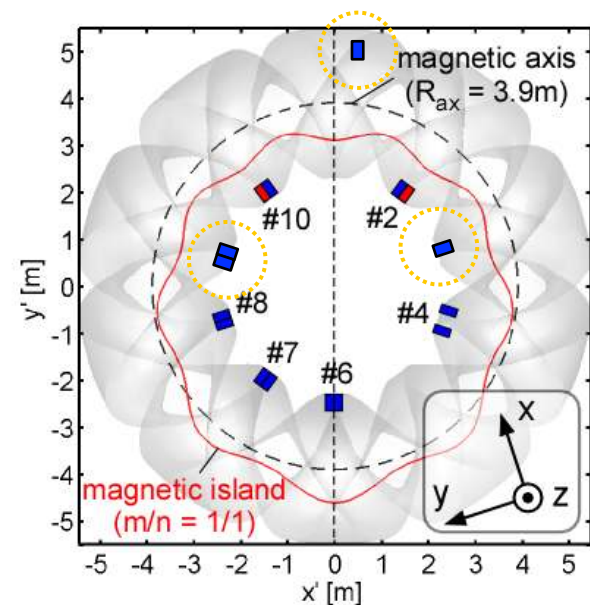
After Detachment

- Modeling and experiments shows radiation localization near the island X-point towards inboard side
- Modeling - power densities 1.5 times higher than experiments
- The change in radiation pattern is similar both in modeling and experiments

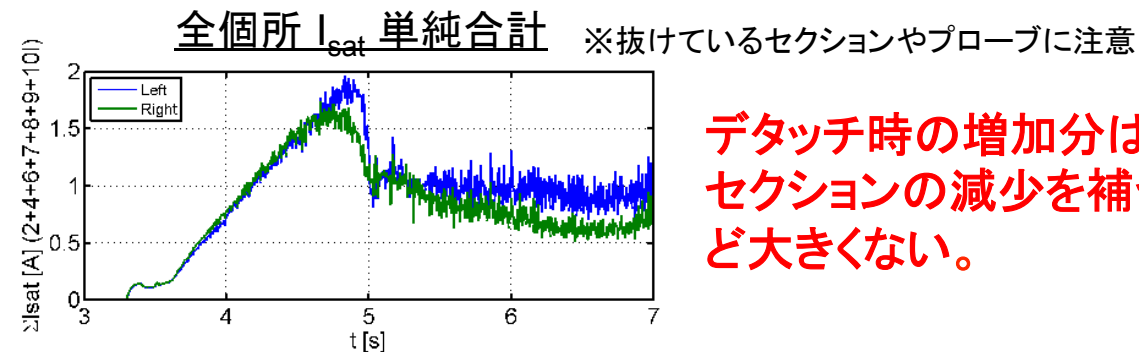


理論モデル(EMC3-EIRENE)は実験結果を定性的に再現

ダイバータ粒子束のトロイダル異方性

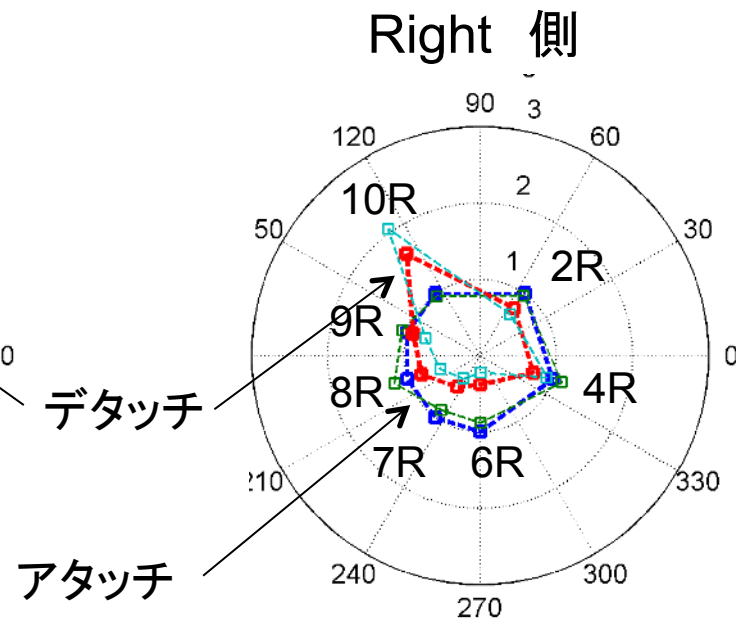
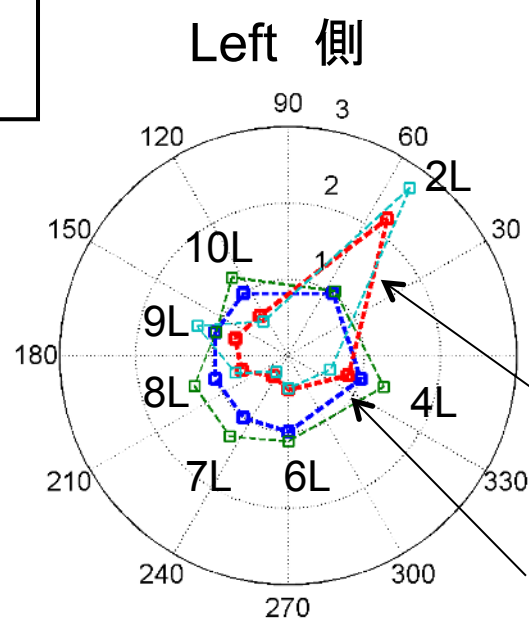
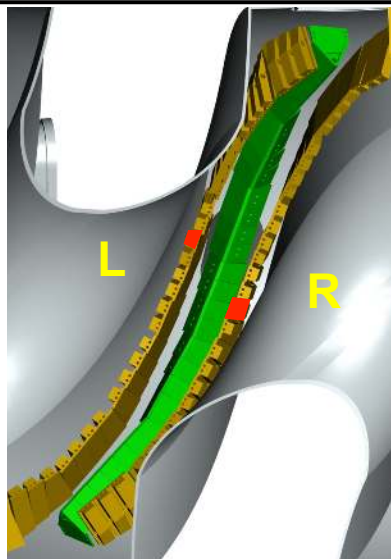


- ✓ トロイダル異方性を観測。磁気島と同じトロイダルモード数、磁気島構造に対しておおよそ対称。
- ✓ 2L、10Rで I_{sat} が増大 (磁気島X点が生じた側にある時)



デタッチ時の増加分は、他セクションの減少を補うほど大きくない。

■: I_{sat} 積分値が増大
■: I_{sat} 積分値が減少



デタッチ

アタッチ

放射損失安定維持の配位(磁気軸)依存性

- ✓ 系統的な磁気軸、LID電流のスキャンを行い、データの拡充を行った。
- ✓ RMP印加による安定なデタッチメントは磁気島がより大きく、閉じ込め領域と磁気島の距離が離れている場合に実現されている。
- ✓ 閉じ込め領域と磁気島の距離が近づく(3.90 ⇒ 3.80 m)につれて、より大きな摂動磁場強度が必要になる。

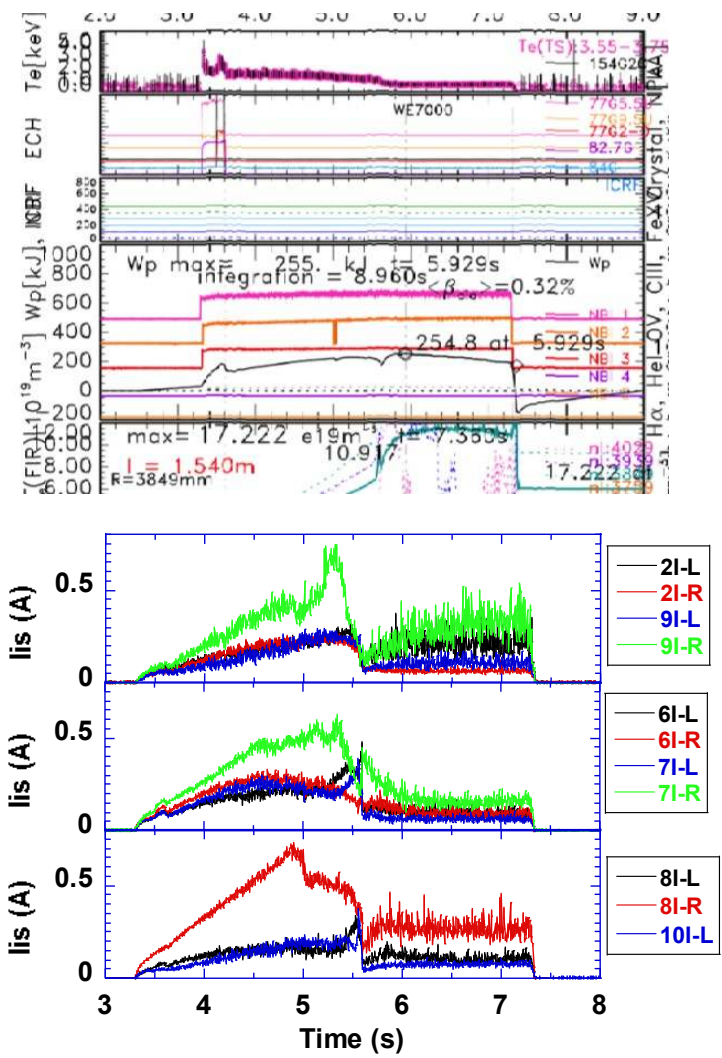
Distance between island & confinement region (R_{ax}) ↑

	→ Island size (LID current)				
	1500 A	1920 A	2500 A	3000 A	3400 A
~10cm (3.90 m)	×	○	○	○	○
~6cm (3.85 m)		×	×	○	○
~4cm (3.80 m)					×
~3cm (3.75 m)	×	×	×	×	×

特徴 ↓

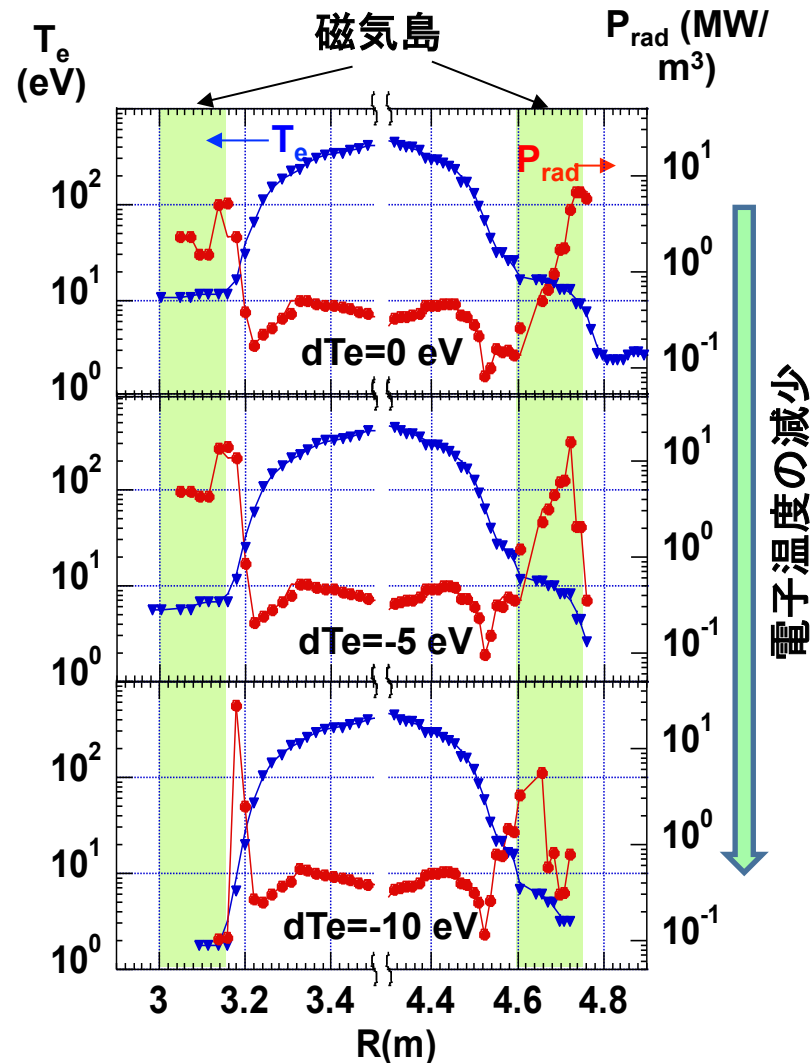
- 3.90mと比較し、放射損失の増大がより大きい。(デタッチ前の約3倍。3.90mでは約2倍)
- トロイダル全域にわたってダイバータ粒子束の減少。
- この特徴の理由を周辺部の磁場構造を考慮して解析を進める。

より最適な配位の存在の可能性(細かい配位スキャンが必要)



摂動磁場によるデタッチメントの安定化機構の解釈

→ 明確な安定ブランチが大きな磁気島 (電子温度平坦化) で現れる



安定ブランチ

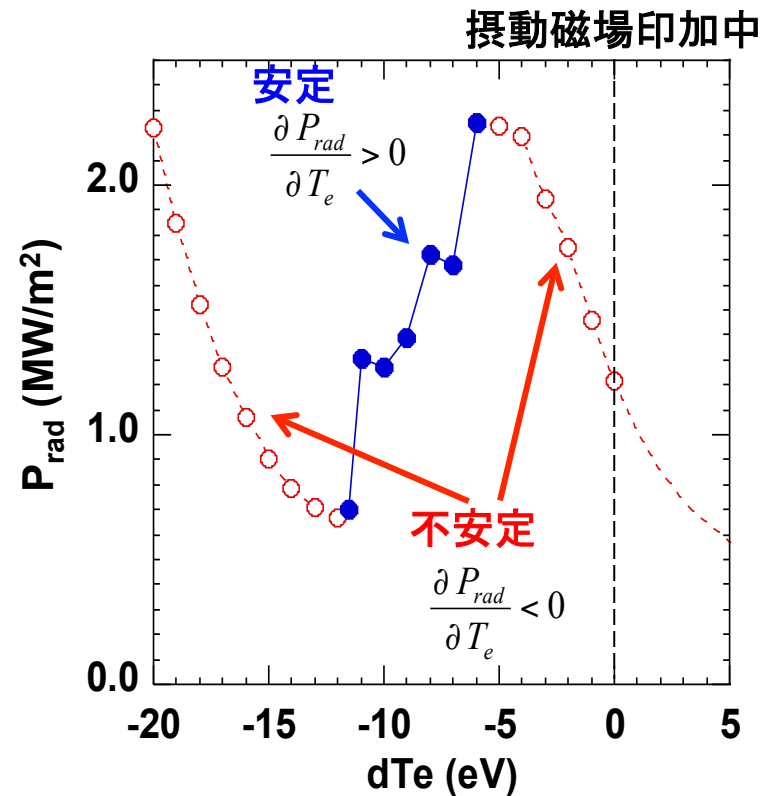
$$\frac{\partial P_{rad}}{\partial T_e} > 0$$

$$T_e \downarrow, P_{rad} \downarrow \rightarrow T_e \uparrow$$

不安定ブランチ

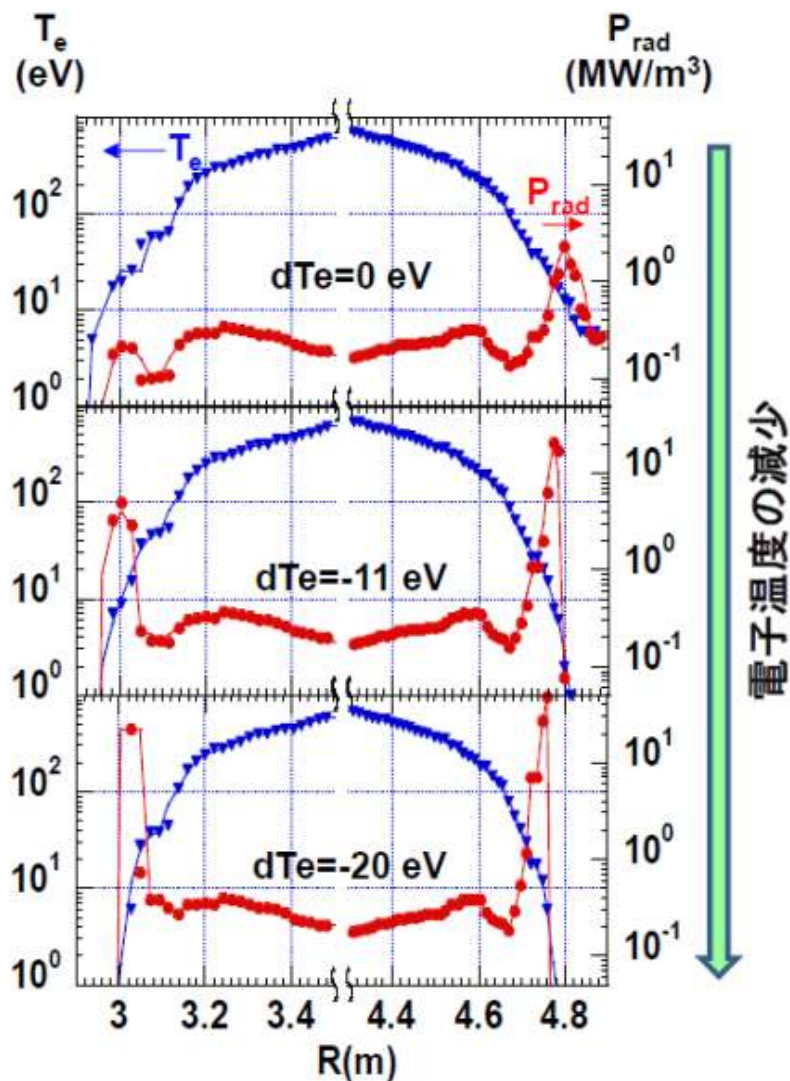
$$\frac{\partial P_{rad}}{\partial T_e} < 0$$

$$T_e \downarrow, P_{rad} \uparrow \rightarrow T_e \downarrow$$



放射領域が磁気島 (電子温度平坦化) を超えて侵入してきた時、安定ブランチが現れる。

RMPが無い場合は、放射領域が内側に侵入：
 →磁気島の無い「滑らかな」温度分布はデタッチメントの安定化効果が無い



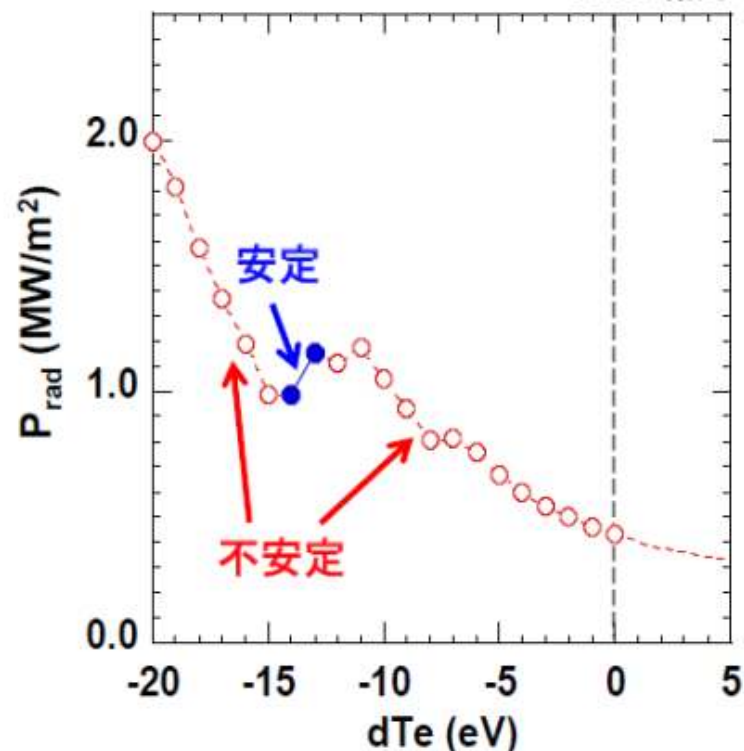
安定ブランチ $\frac{\partial P_{rad}}{\partial T_e} > 0$

$T_e \downarrow, P_{rad} \downarrow \rightarrow T_e \uparrow$

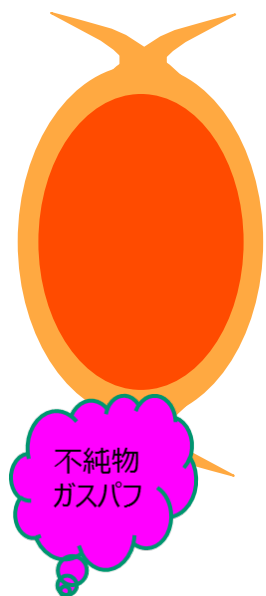
不安定ブランチ $\frac{\partial P_{rad}}{\partial T_e} < 0$

$T_e \downarrow, P_{rad} \uparrow \rightarrow T_e \downarrow$

RMP無し



ストキャスティック層中の残留磁気島の微細構造により、僅かな安定ブランチが現れる
 →しかし、放射領域の侵入を止める程の安定効果はない

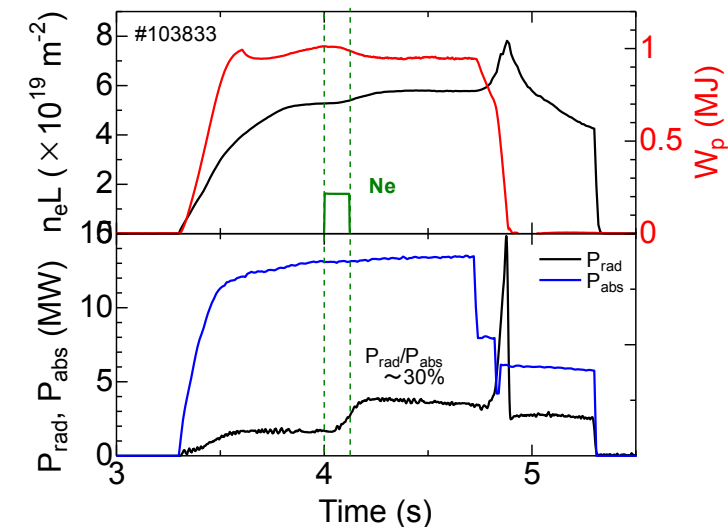


不純物ガスパフデタッチメントの課題

- ✓ 放射損失の増大(現状30%⇒80-90%)
- ✓ 最適運転領域の同定
 - 放射領域と周辺温度・輸送の関連の解明
 - 放射に寄与する不純物価数の同定
 - トロイダル異方性の違い
- ✓ 放射損失増大の定常維持

第17サイクルでの試み

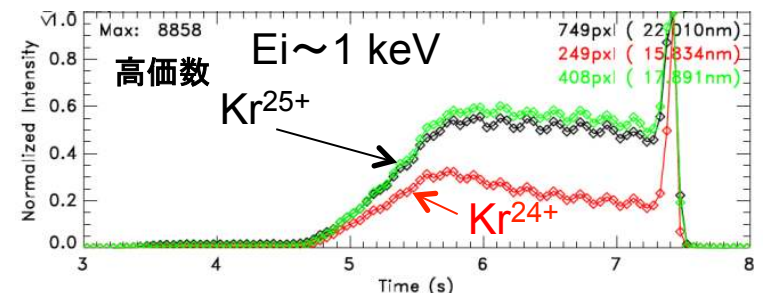
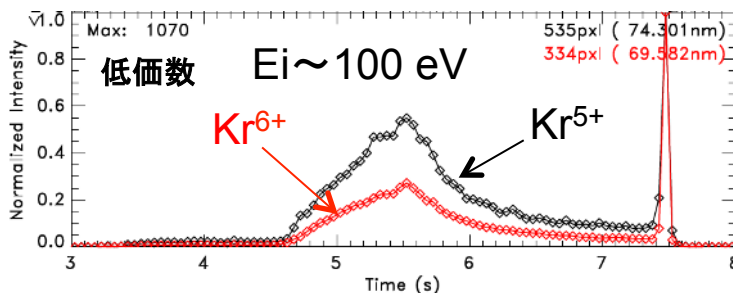
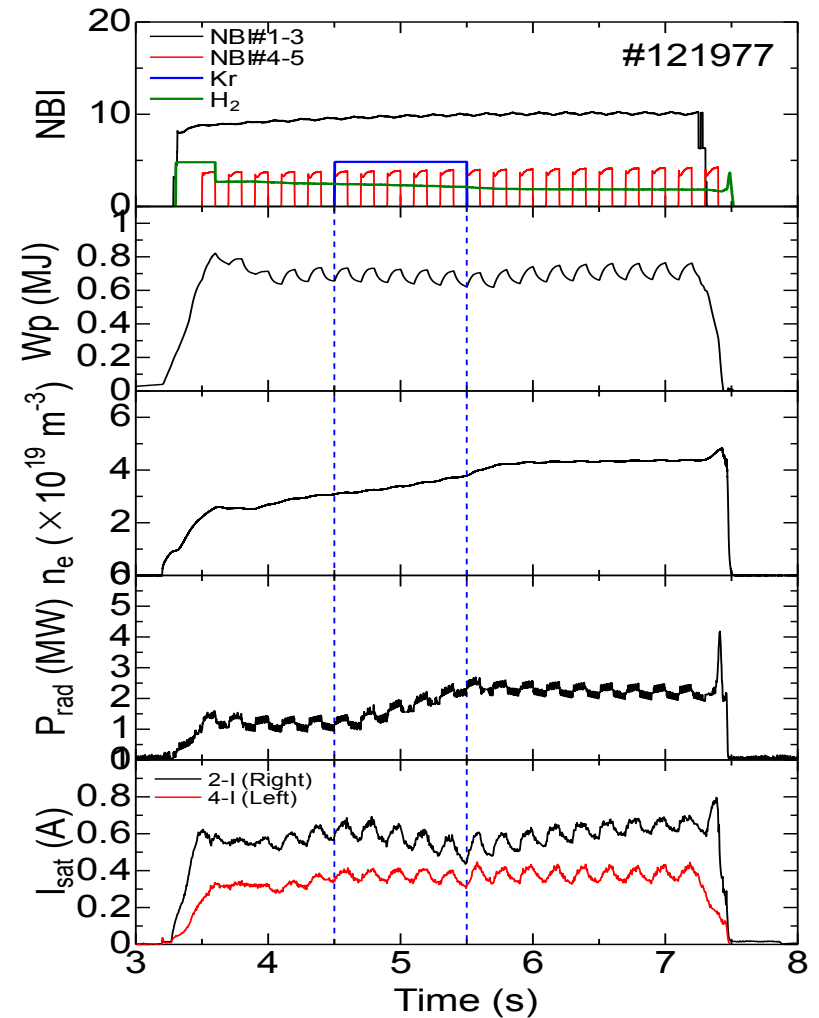
- ✓ 低Z不純物に加えて、高Z不純物(クリプトン)の使用
- ✓ 分光計測による放射位置の同定
- ✓ ガス種による違い(損失量、トロイダル異方性)
- ✓ 配位依存性(運転領域)
- ✓ 長時間維持



高Z不純物による放射損失増大とその放射領域の推定

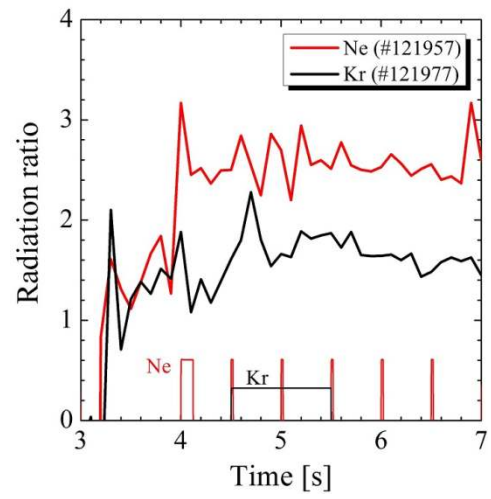
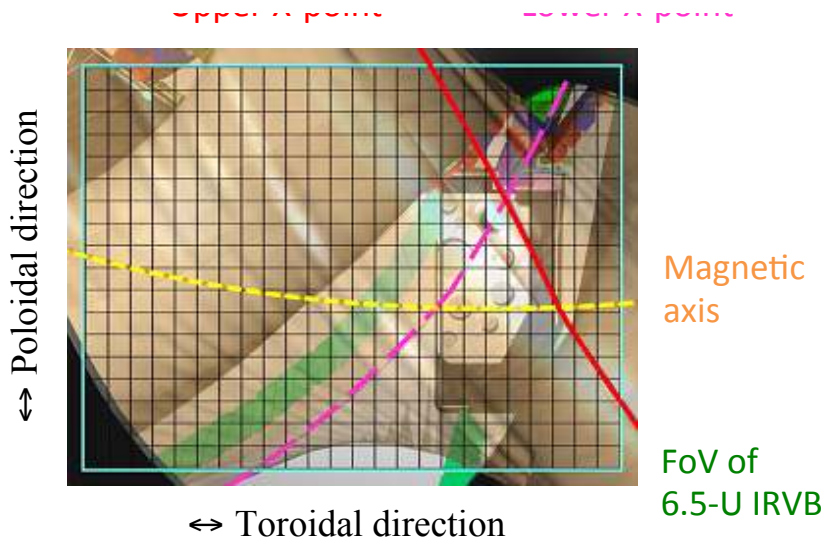
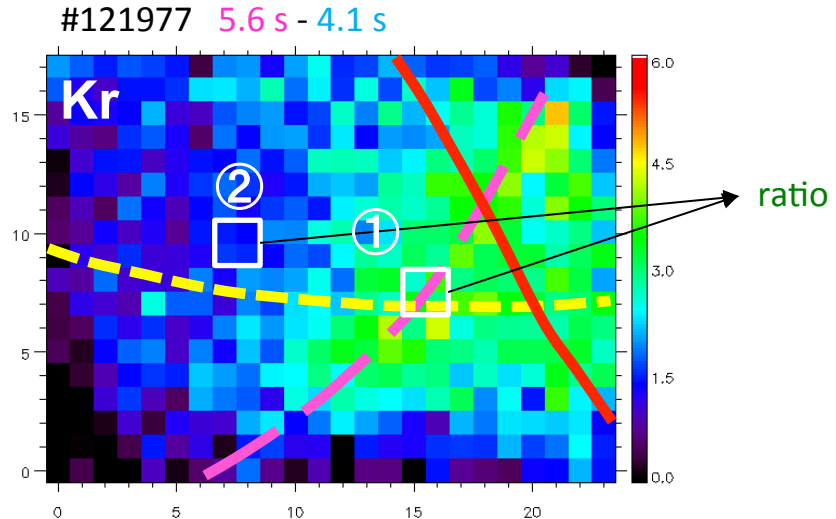
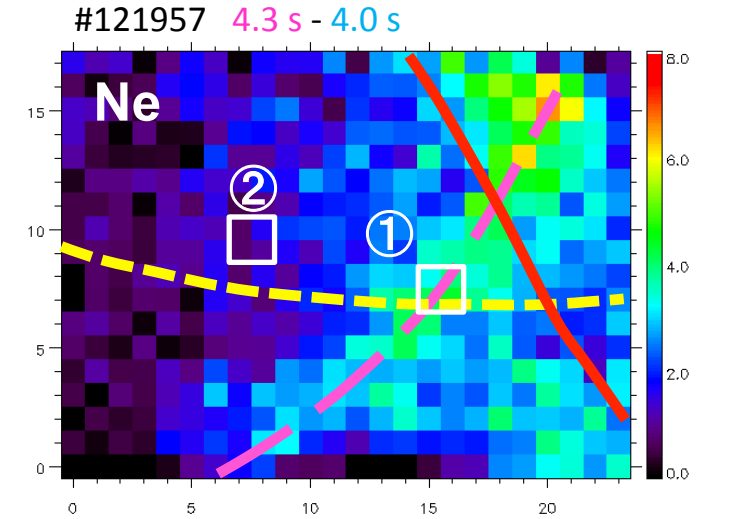
- NBI4秒放電にてKrパフによる熱負荷軽減を試みる。配位は3.60 m, -2.75 T。
- Kr入射により、加熱入射パワーの25%まで放射損失が増大。ただし、ダイバータプローブの I_{sat} の減少は少ない。
- 密度はパフ後上昇するが、 W_p はほとんど下らない。
- 他の不純物と比較して長い時定数で増大し、パフ停止後もゆっくりと減衰する。
- **1 keV辺りで発光する高価数のKrイオンと、放射損失の波形が類似しており、放射損失変化の大部分をコア領域で発光するイオンが担っている可能性あり。**

⇒周辺で発光するイオン(Ne)とKrを同時入射して放射損失を増やせるのではないかな？



放射位置の同定とガス種依存性 (Ne、Kr) (イメージングボロメータ)

放射分布の差分 (デタッチ後 - デタッチ前)



放射損失の比①(下側X点)/②(コア)の時間発展

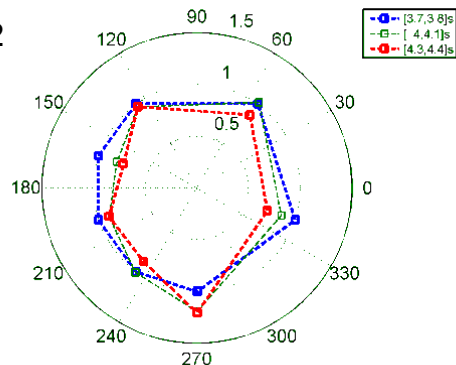
放射はX点付近。Krに比べ、Neではパフ後の(6.5下側)X点付近の放射の増大がより明確に見られる ⇒ Krはより内側で放射していることを示唆か。

不純物毎のダイバータ粒子負荷のトロイダル分布

Left

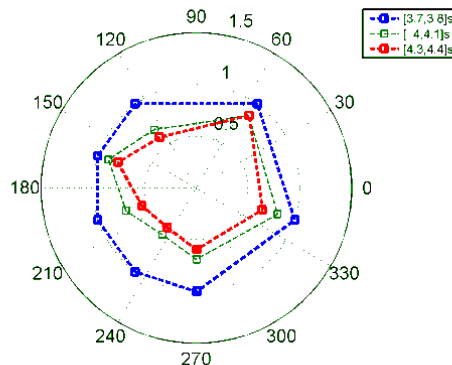
123366 Left

N₂



Right

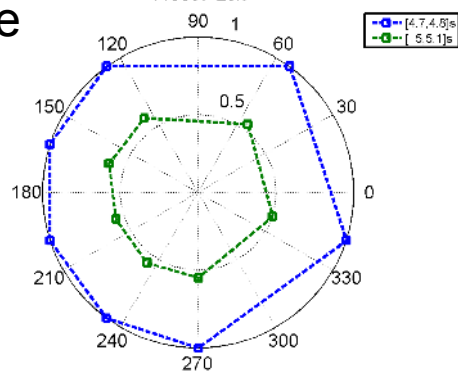
123366 Right



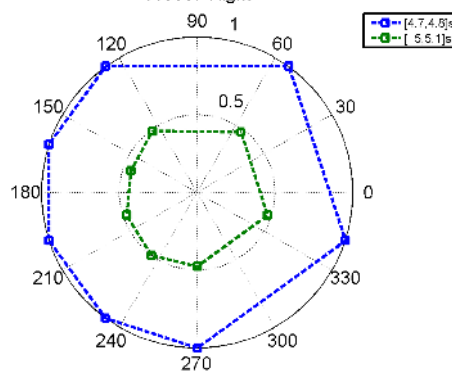
✓ N₂パフ:
トロイダル異方性はあるが磁気島デタッチほどではない。左右のタイルで減少量に違いあり。

Ne

118067 Left



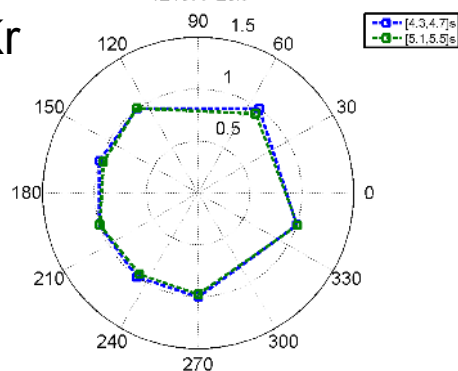
118067 Right



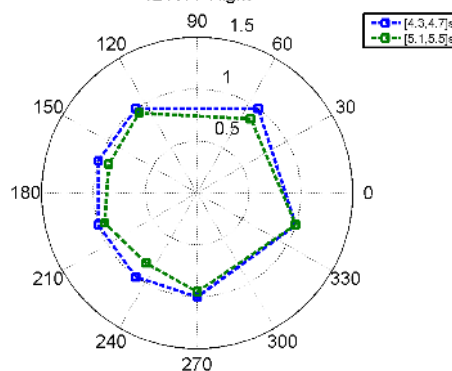
✓ Neパフ:
トロイダル異方性はない。左右のタイルの非対称性もない。

Kr

121977 Left

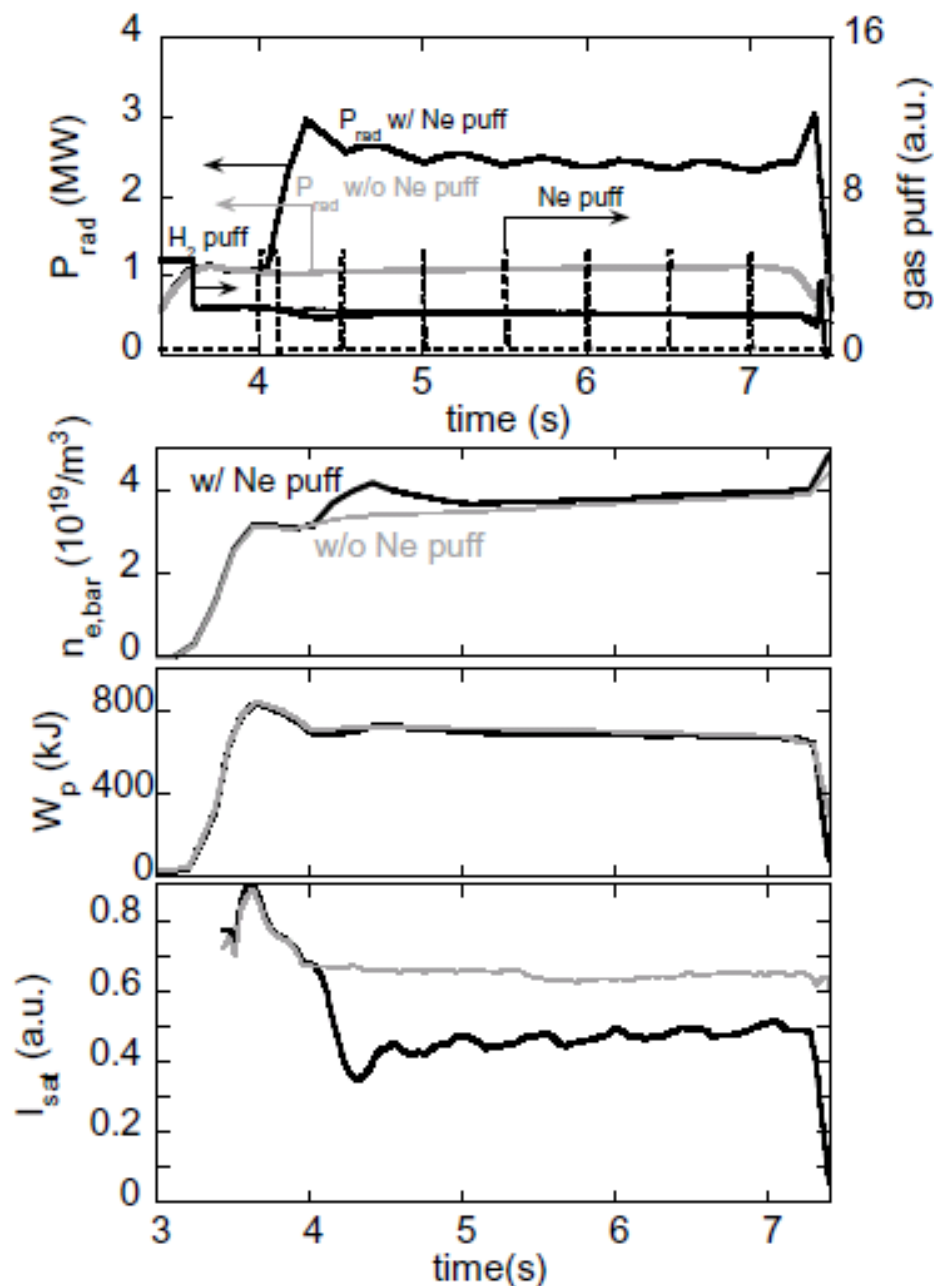


121977 Right



✓ Krパフ:
現状ではデタッチメントに至っているとは言えない。トロイダル異方性はなさそうだが左右の非対称性はあるそう。よりはっきりしたデタッチを起こすことが今後の課題。

ネオンパフによるデタッチメントの定常維持

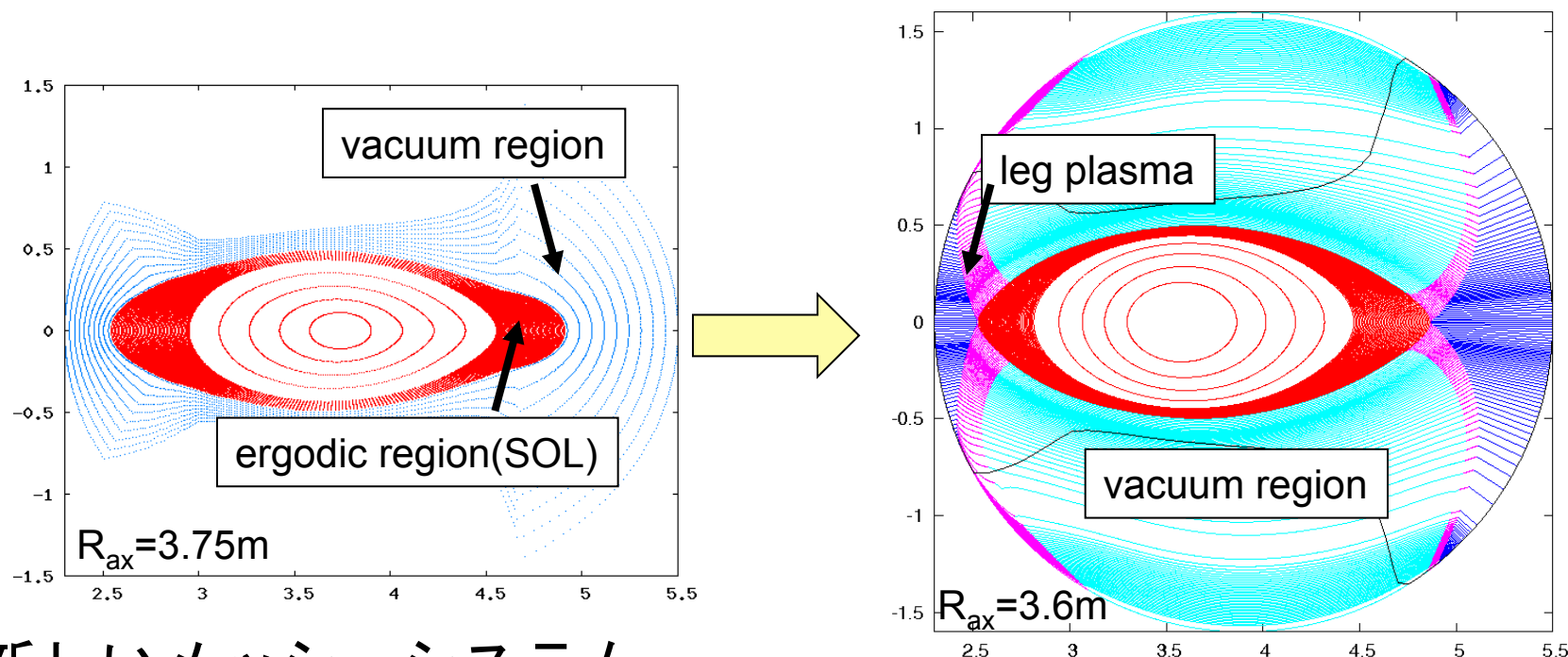


- ・Neパフによるデタッチメントを数秒単位で保持することが目的。
- ・ネオンパフをパルス状に追加。
加熱入力約2~3割の放射損失を、3.5秒程度安定して保持。
- ・ネオンパフの有無で、線平均電子密度、蓄積エネルギーに変化は見られず。
- ・ダイバータへの粒子束は約5~7割に低下。その後、一旦上昇した放射損失が低下すると共に、粒子束は増加してゆく。
- ・**パルス状パフ量を調整することで、放射損失増大状態の定常維持が可能。**

EMC3-EIRENEコードのメッシュの拡張



SOLとダイバータレグで同時に3次元輸送
シミュレーションを可能にする

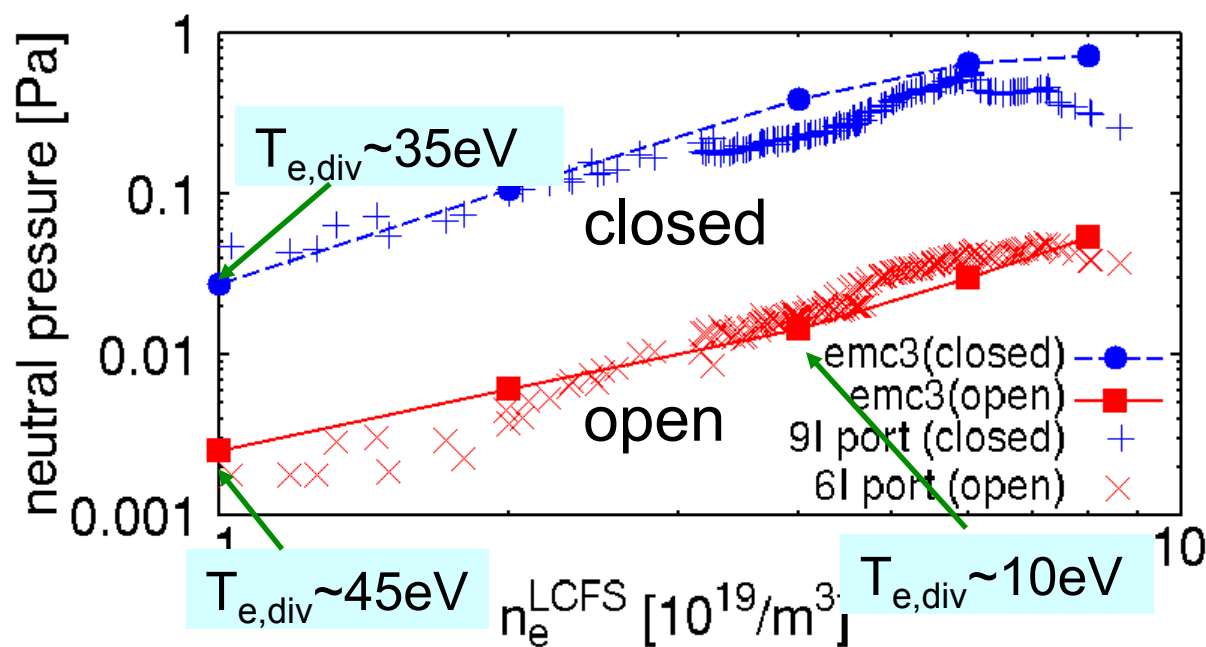


新しいメッシュシステム

- それぞれの領域を個別に作成した後、一つのシステムに統合.
- 局在化しているプラズマと中性ガスの相互作用を含む閉じた系でシミュレーションできるようになった。

電子密度に対する中性ガス圧のスケーリング

- ◆ 加熱パワー: 8MW, LCFSでの電子密度: 1, 2, 4, 6, $8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.
- ◆ 電子密度に対する中性ガス圧の依存性
 - 閉ダイバータ構造、開ダイバータ構造の配位の違いによらず、実験結果と同じ依存性(スケーリング)が得られた



実験・シミュレーション
による中性ガス圧の比較

実験で観測された中性粒子圧力と良く一致する

第17サイクルのまとめ

✓ 不純物ガスパフデタッチ

- ❖ 高Z不純物としてKrを本格的に使用し始めた。SOXMOS等の分光計測を用いて発光位置の推定を試み、コア領域で高価数のイオンが発光していることが示唆された。
- ❖ Neについては、磁場配位、密度への依存性のデータを系統的に取得し、放射損失増大状態の長時間維持にも成功した。
- ❖ ガス種ごとにトロイダル異方性の有無を確認した。

✓ 磁気島デタッチ

- ❖ イメージングボロメータ、ダイバータ分光器、静電プローブの整備を進め、摂動磁場印加デタッチメント時の放射領域の同定、時間発展、トロイダル異方性について調べた。
- ❖ 幅広い磁場配位でデータを取得し、安定保持機構を摂動法的な観点で考察を進めた。

✓ ECH完全デタッチ

- ❖ ECHによる中心加熱完全デタッチプラズマを生成し、分布変化による中心加熱の劣化が無ければ良好な閉じ込めを維持できることを実証した。
- ❖ デタッチとITBの両立という、新しい放電形態を発見した。

- ✓ 数値実験グループとの連携により、LHD開／閉ダイバータ構造を反映した**周辺輸送シミュレーション研究が進展**した。

第18サイクル以降での課題

✓ 不純物ガスパフデタッチ

- ❖ 今後、適用する原子分子モデルを検討し、放射領域の同定や寄与する発光ラインの同定を行う。
- ❖ Krは閉じ込め劣化無く比較的コアからの放射を増やすことができているため、実験条件をより詳細に探査すると共に、周辺での放射を増やしているNeとの組み合わせで放射損失の増大を試みる。

✓ 磁気島デタッチ

- ❖ 3次元的に計測した放射領域とその時間発展をシミュレーションとの比較を更に進め、エネルギーバランスの評価に繋げる。

✓ ECH完全デタッチ

- ❖ 密度や加熱パワーの精査を行い、デタッチメントを定常維持できる条件を探査する。

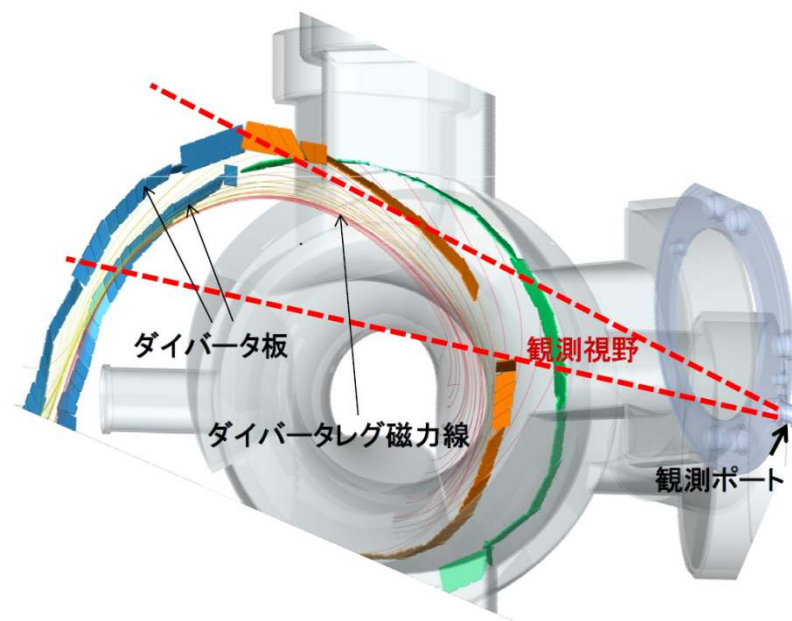
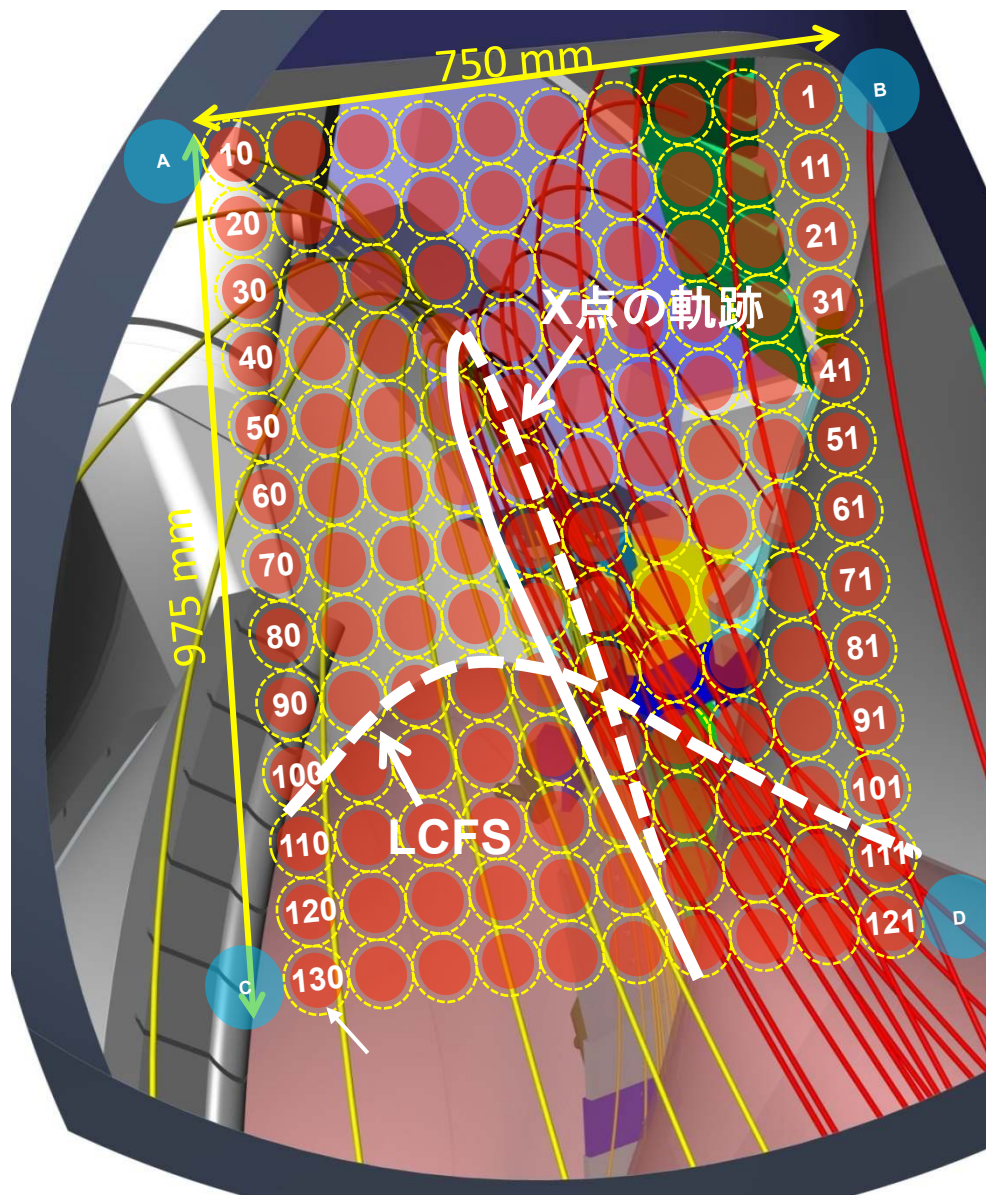
✓ 今後、各デタッチメントの描像から、デタッチメントに関する**共通の理解**へと結びつけるため、整備された計測を駆使し、解析を進める。

✓ 数値シミュレーションを用いて、プラズマや不純物の**輸送解析**を進める

予備資料

ダイバータ領域の発光分布計測

ファイバー列と視野の関係



第17サイクルに向けて行った改造

チャンネル数を40ch→130chに増設し、より広域な視野を確保した。

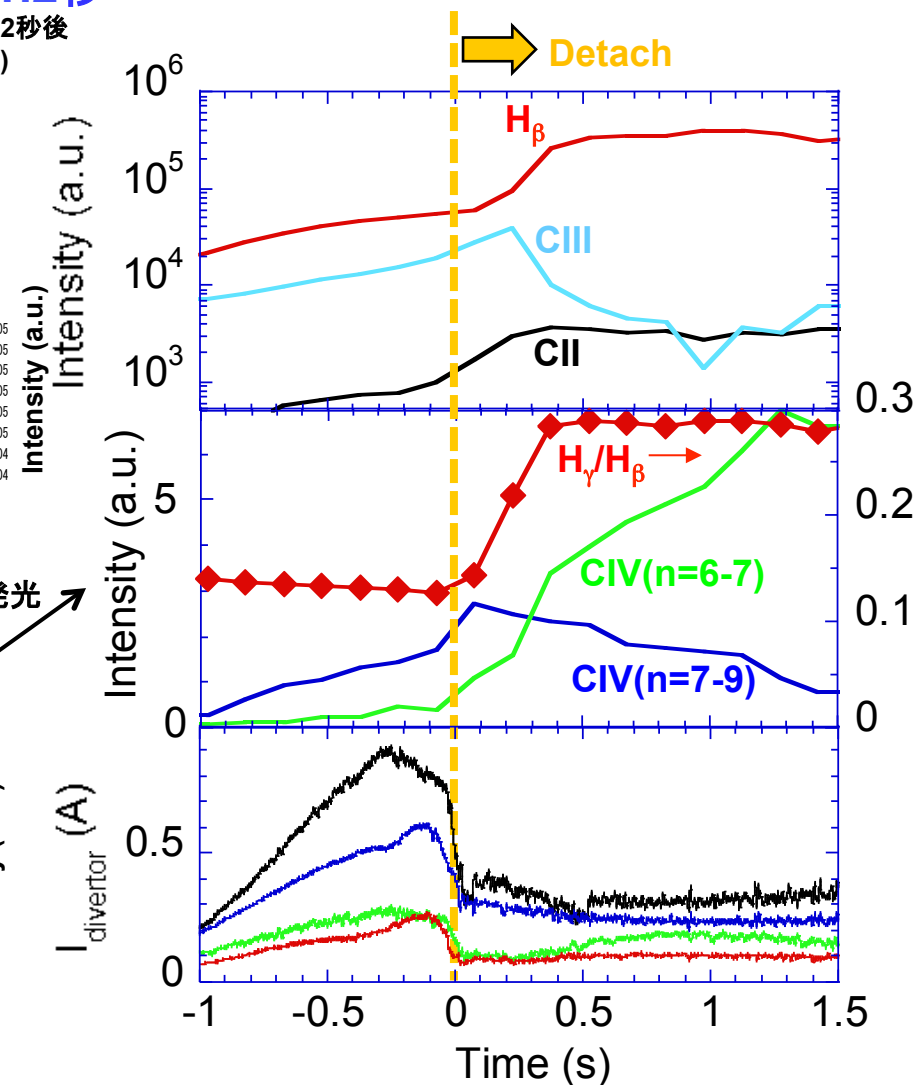
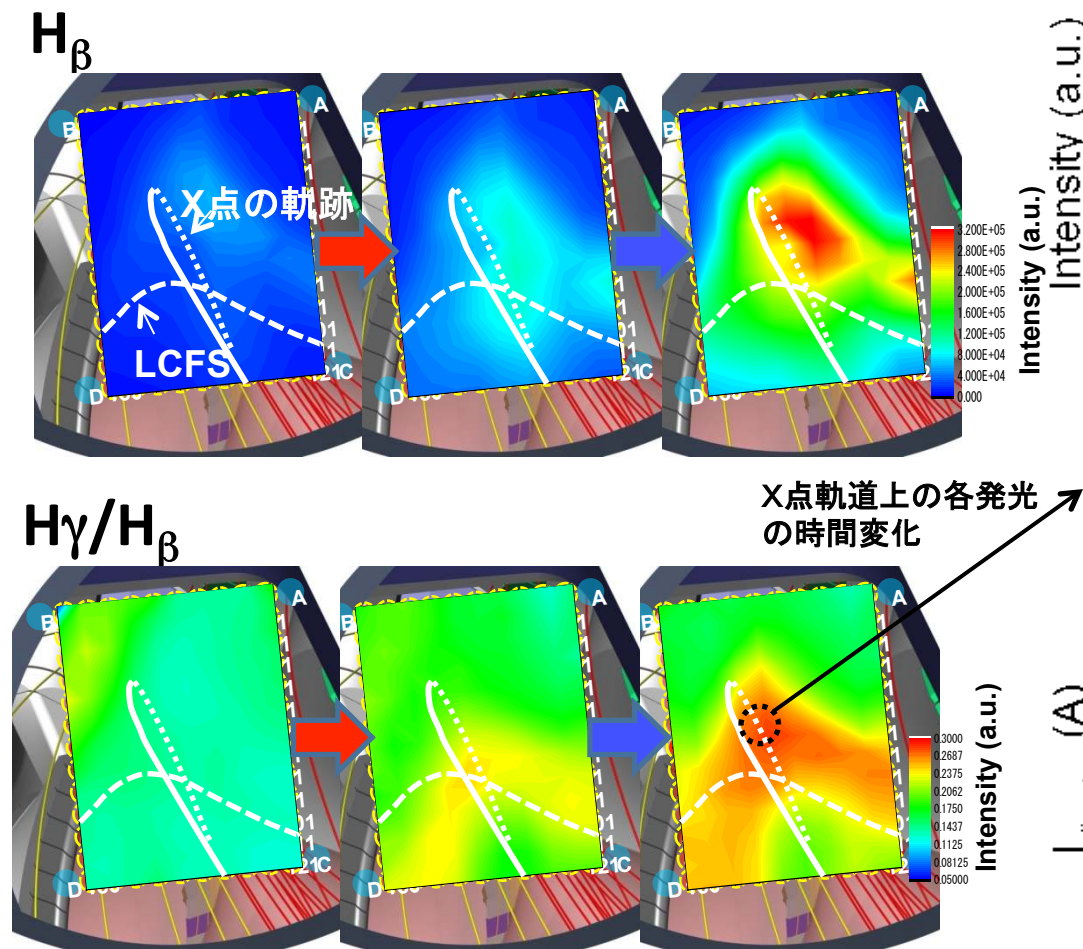
放射領域のダイナミクスを観測可能にした。

ダイバータ領域の発光分布計測

アタッチ
 デタッチ遷移~0.3 秒前
 (t=4.60 秒)

デタッチ直後
 デタッチ遷移~0.3 秒後
 (t=5.20 秒)

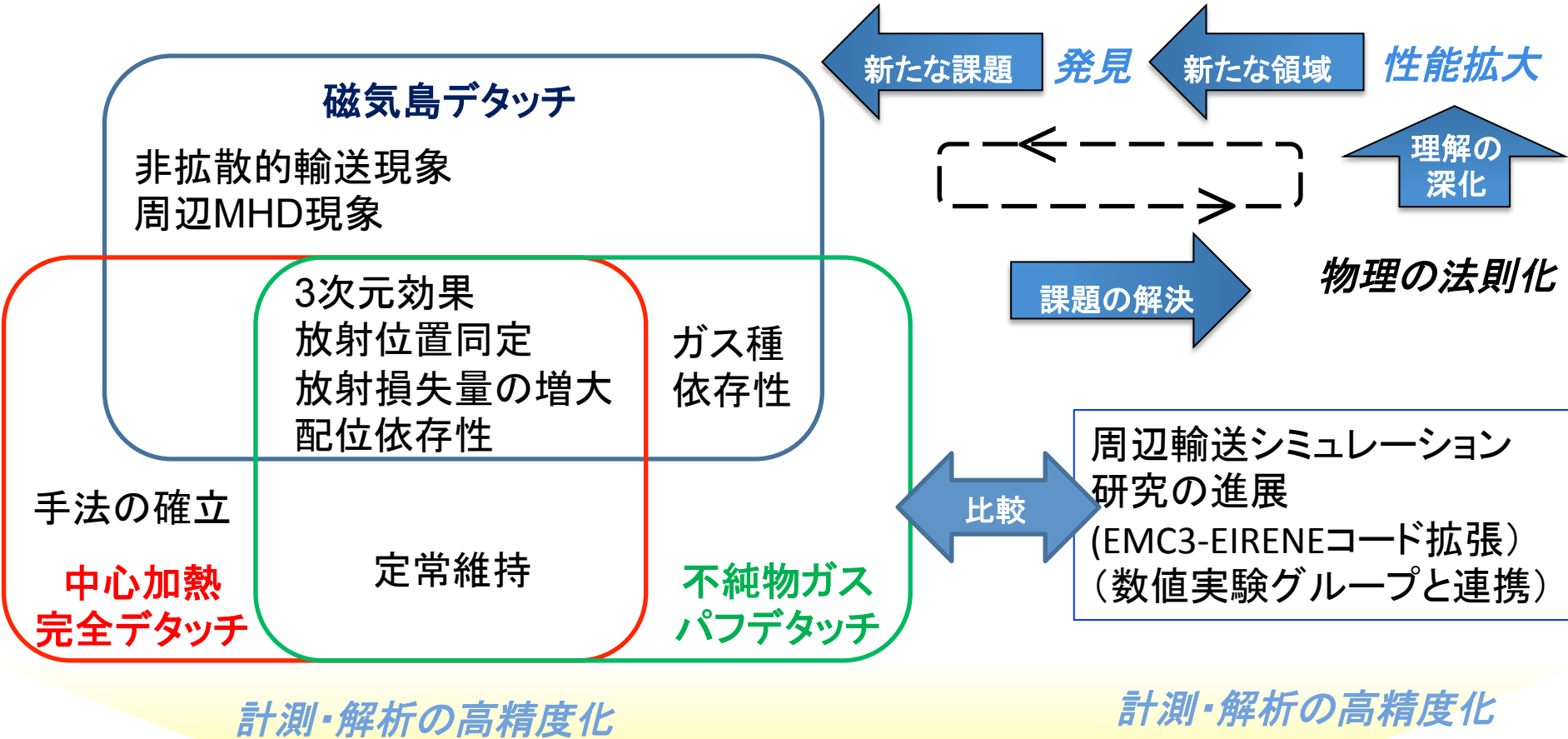
デタッチ後1.2秒
 デタッチ遷移~1.2秒後
 (t=6.10 秒)



H_{β} : デタッチの進行とともに強度が増加し、径方向内側に移動する

H_{γ}/H_{β} : デタッチの進行とともに増加し、ほぼLCFSに沿って極大値が分布している

ダイバータ熱負荷低減実験の目的と解決すべき各課題



- 核融合炉へ外挿しうる熱負荷軽減運転の確立**
- ・十分な放射損失量(～80%)
 - ・定常維持
 - ・良好な閉じ込め性能との両立

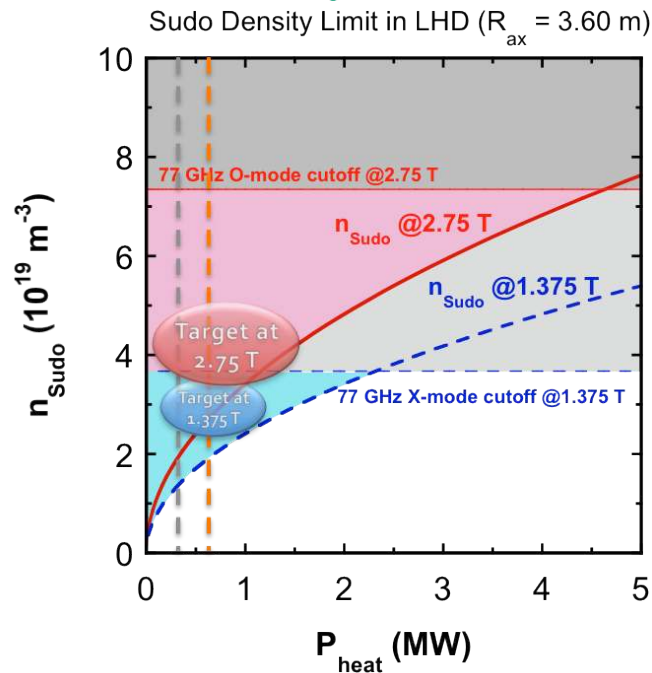
磁気島デタッチメントの課題

- ✓ サーパンスモードでは周辺密度増大によるNBIの中心加熱の減少、閉じ込め劣化

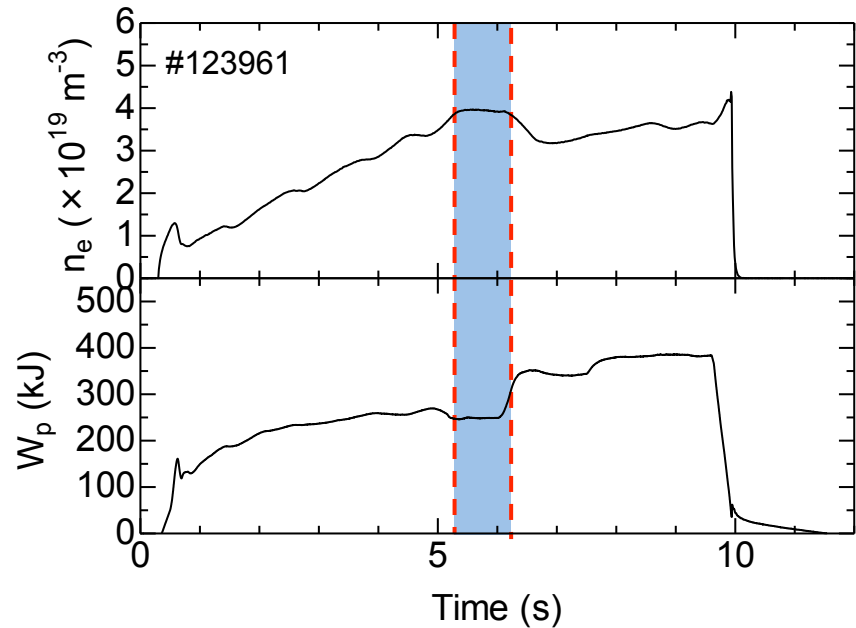


第17サイクルでの試み

- ✓ ECHによる中心加熱でのデタッチメントの試み
- ✓ デタッチプラズマの閉じ込め性能の評価

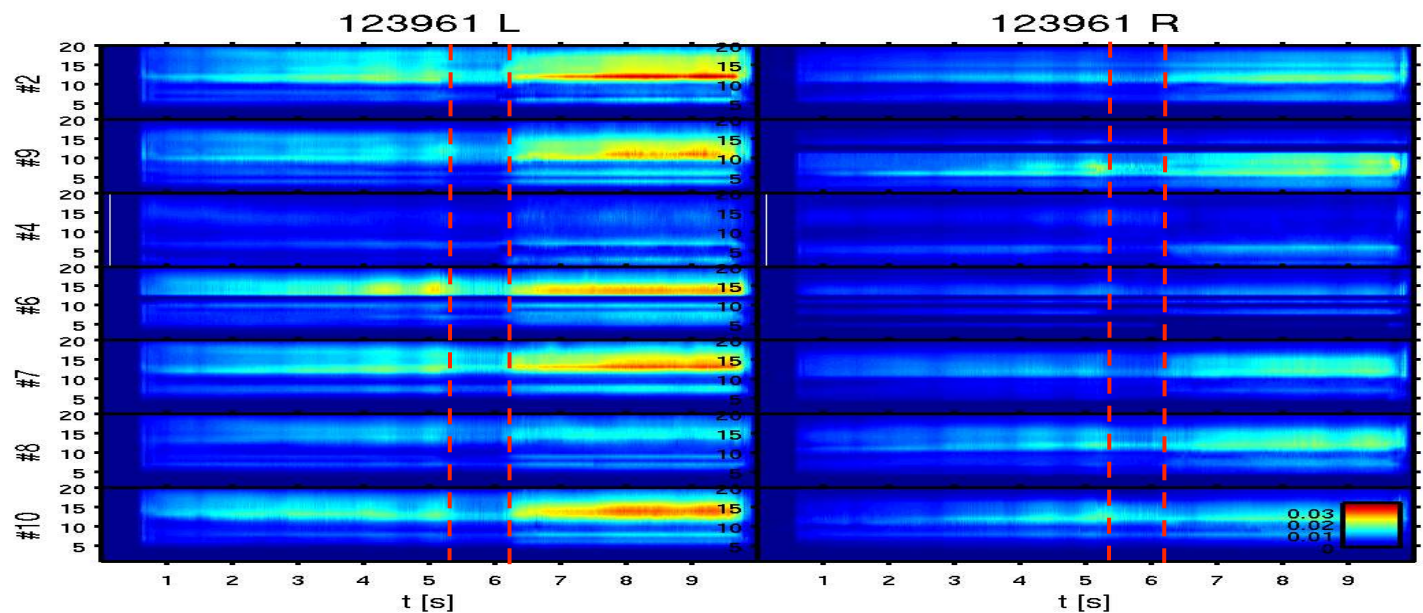


中心加熱時の完全デタッチメント

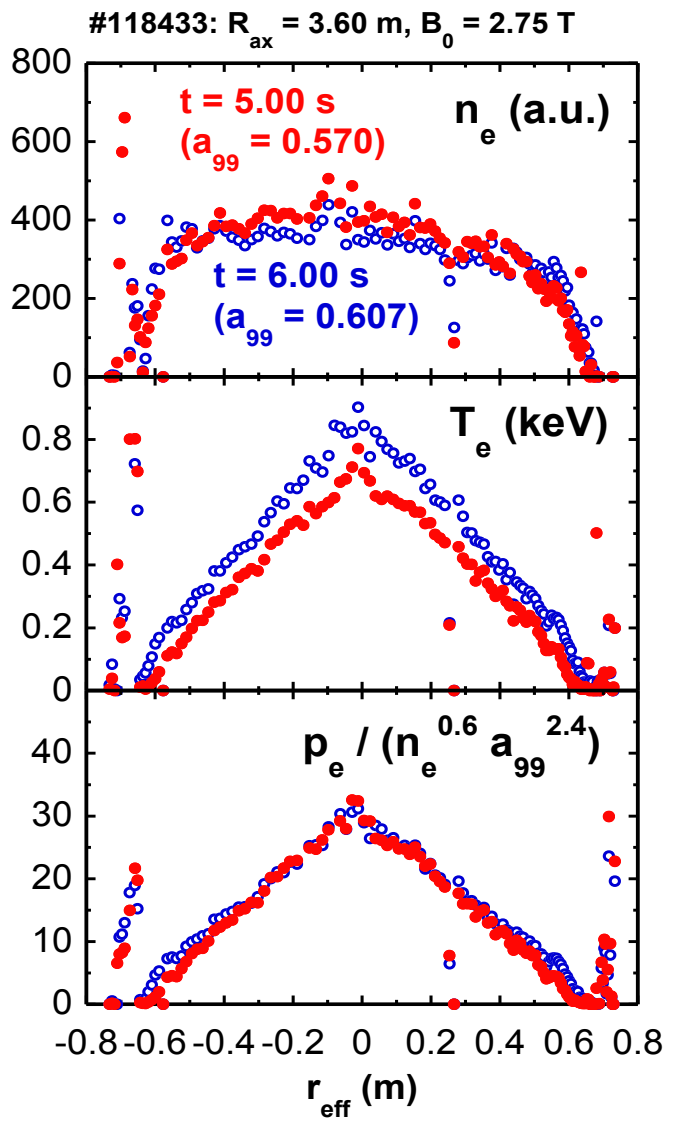


- ✓ 20からの154 GHz - 300 kW - 10秒入射のECHで一定密度を保持し、放電途中で密度を増加。
- ✓ $t = 5.2$ sにデタッチメントに移行。加熱の追加により、 $t = 6.1$ sで再アタッチ。
- ✓ トロイダル方向すべての位置で I_{sat} の減少を観測し、完全デタッチメントが達成されている。

各トロイダル位置でのダイバータプローブアレイ I_{sat}



中心加熱完全デタッチメントの閉じ込め特性



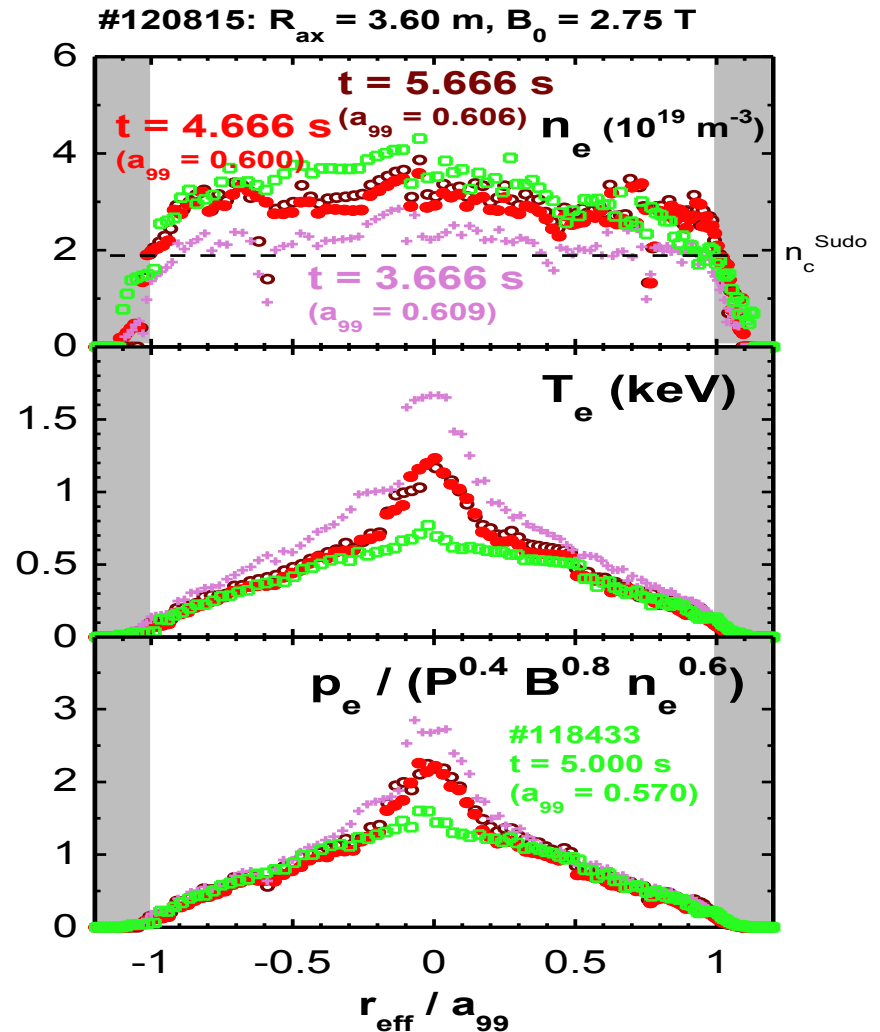
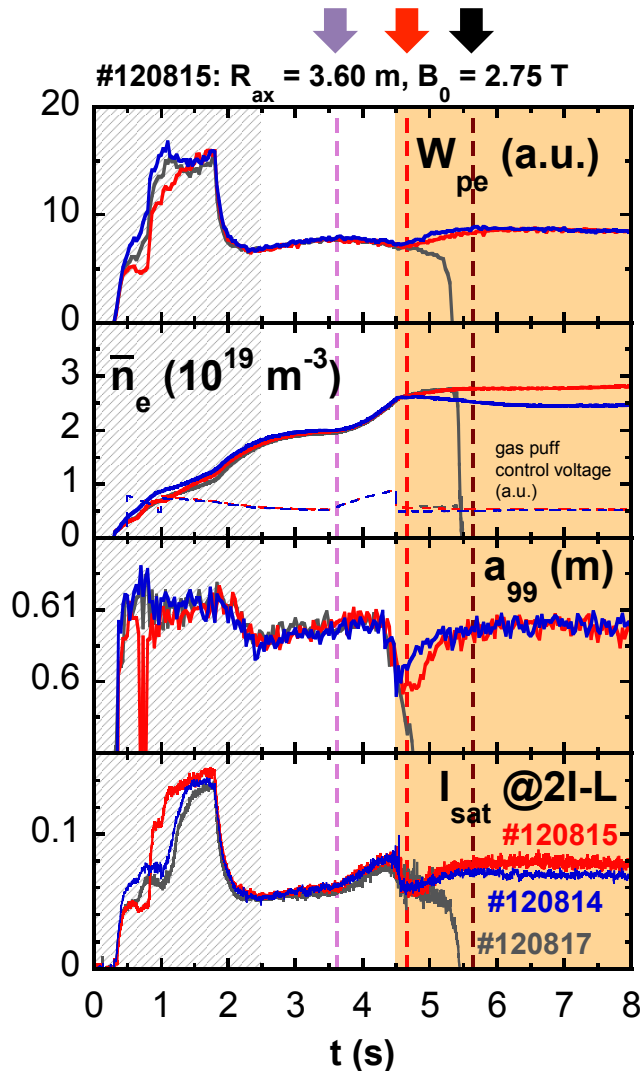
完全デタッチ時と(●)、再アタッチ時(○)の密度・温度・ジャイロボーム規格化圧力分布

ジャイロボーム規格化圧力分布
局所圧力: $p_e(r_{eff}) \propto n_e(r_{eff})^{0.6} a_{99}^{2.4}$
と仮定し、規格化したもの

完全デタッチと再アタッチ時(密度がほぼ同じ場合)では、完全デタッチでの温度が低いですが、**ジャイロボーム規格化圧力分布は両者ほぼ同じ**

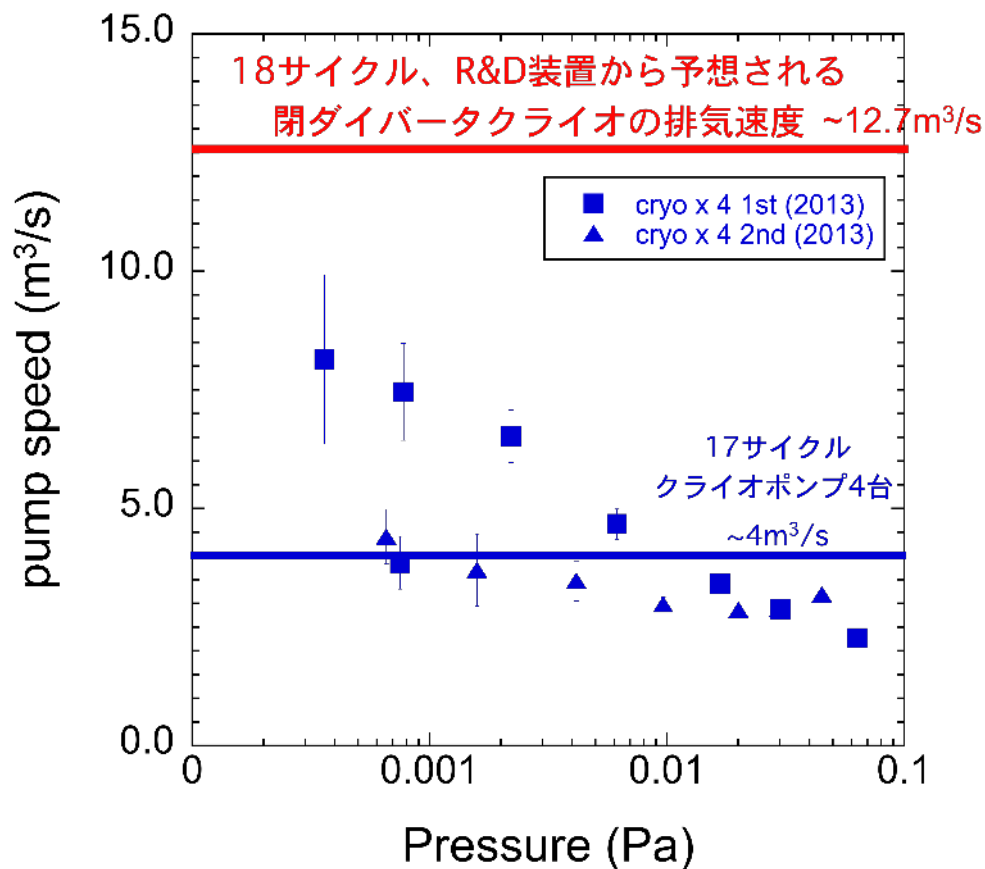
プラズマ小半径がシュリンクしていることを考慮すれば、**完全デタッチメントプラズマの閉じ込め性能はアタッチ時と同等で、劣化は無い。**

電子ITBと完全デタッチメントの両立



- ✓ 154 GHzの中心集光により、温度分布に中心温度のピーキング(+、電子ITB)
- ✓ コアの電子ITB領域はデタッチ時に若干小さくなるものの(●)、その後の高密度フェーズでも維持された(○)
- ✓ デタッチメントとITBが両立することを実証した。

閉ダイバータクライオ排気速度試験結果概要



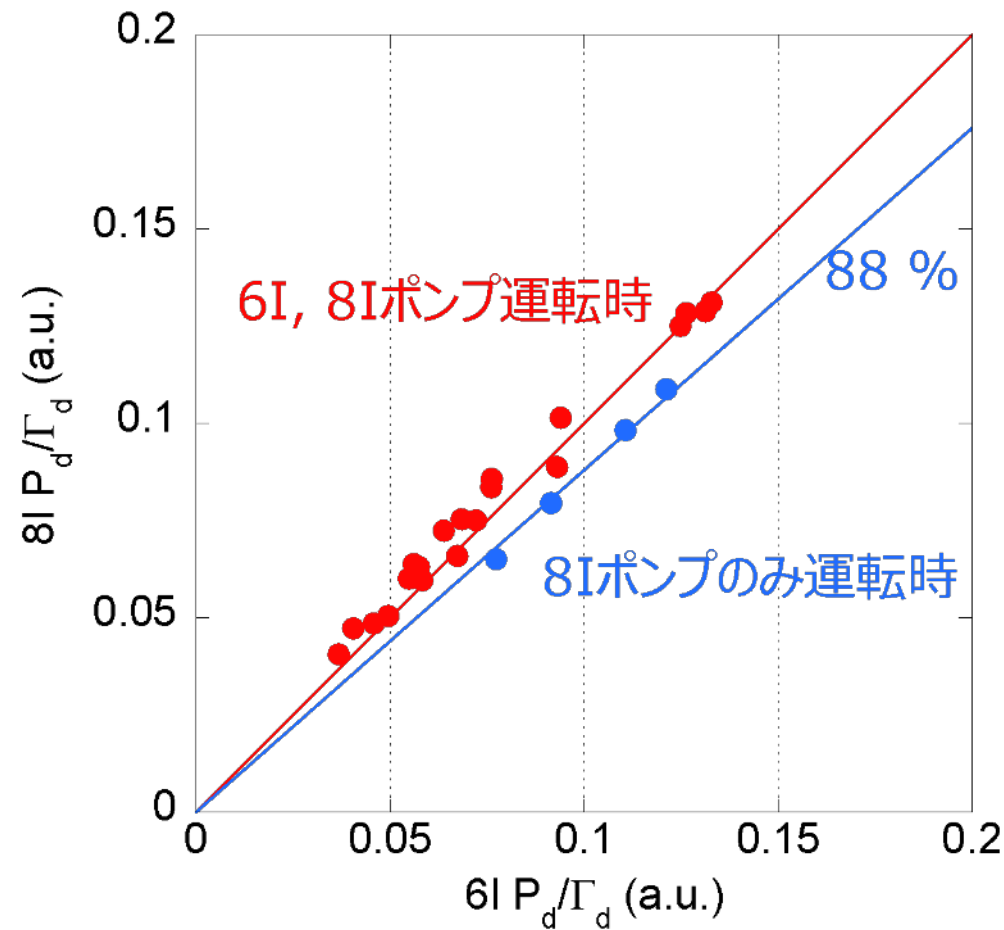
- 17サイクル時のクライオ排気速度試験では、排気速度は約4 m^3/s であり、残念ながら必要な性能を満たしていない。また、排気速度に強い圧力依存性が見られているが、R&D試験からは、**使用している活性炭の排気容量が少ない**ことが原因であることを示唆。
- 18サイクルに向け、1セクションにおいて閉ダイバータクライオポンプ活性炭を変更し、高性能化を進めている。R&D試験の結果、既設のクライオポンプを含め、**12 m^3/s 以上**の排気速度(17サイクル時の**3倍**)が得られる予測。

閉構造ダイバータを用いた周辺粒子制御

(課題) 粒子制御によりプラズマを高性能化し、ダイバータ排気特性の評価、及び粒子バランスの理解を得る

- ECHプラズマでのクライオ排気速度評価
- LHDでの粒子バランス評価

ダイバータ部排気の効果



閉ダイバータの圧力を、クライオポンプを稼働したセクションと非稼働のセクションで比較

ダイバータ圧力範囲：0.05-0.2 Pa

ダイバータへの粒子束で規格化した圧力は、クライオポンプを稼働したセクションが12%程度低くなっている



クライオポンプを4セクションで稼働すれば、リサイクリング粒子束が4.8%程度減少していると期待されるが、プラズマへの効果は明確ではない。

4セクションのダイバータポンプで排気された粒子数

閉ダイバータクライオ水素吸蔵量

実施日	10/29-11/01	11/20
Gas from NBI (Pam^3)	2200	120
Gas Puff (Pam^3)	2100	960
H pellet (Pam^3)	1700	300
閉ダイバータクライオ (Pam^3)	200	60
全ガス量に対する割合	0.033	0.043

全投入水素量に対し、3~4%程度が閉ダイバータクライオで排気されている。

局所粒子バランスからは全粒子の4.8%程度が排気と評価できる。

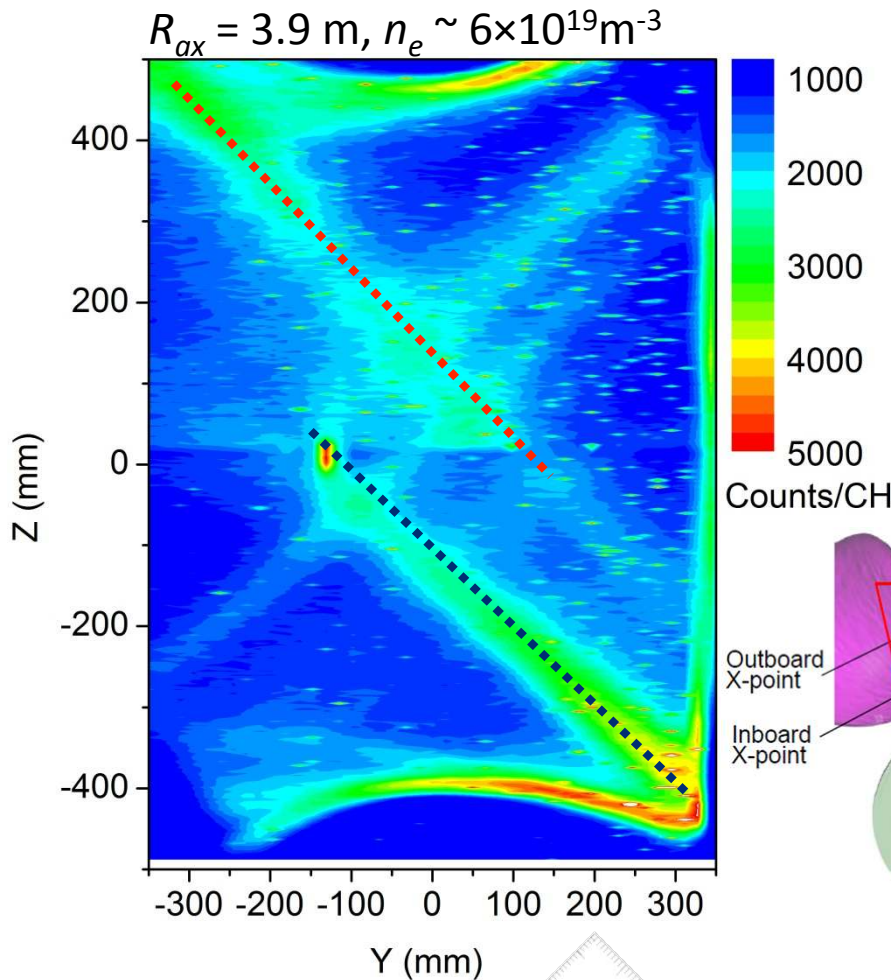
周辺プラズマ中における粒子・不純物輸送の物理機構の解明

(課題) 周辺プラズマの詳細計測や新規解析手法を取り入れ、粒子・不純物輸送を評価する

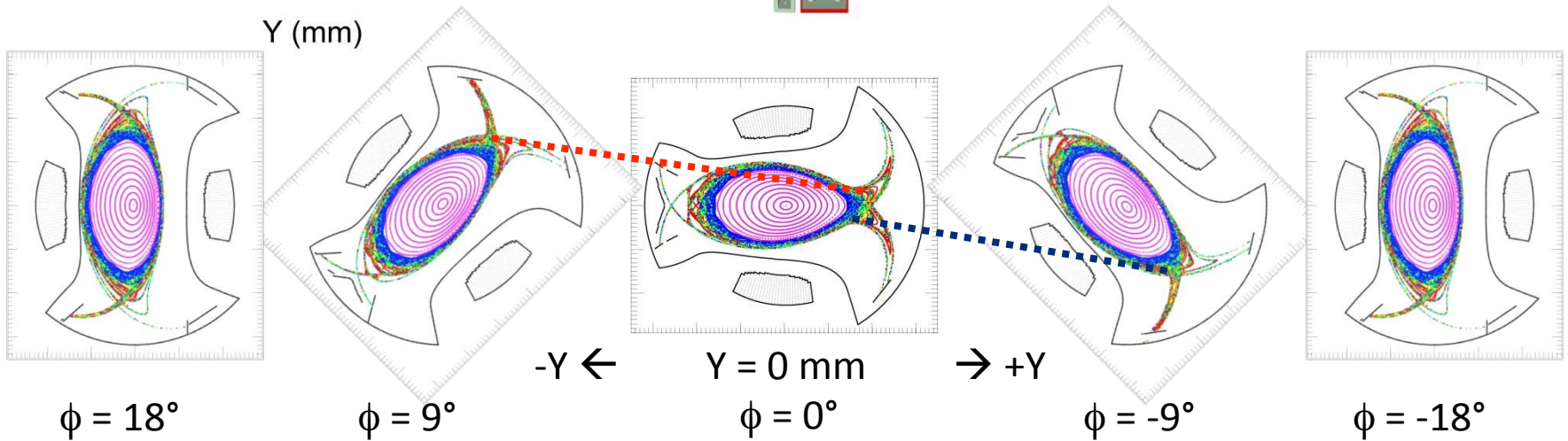
- Core Density Collapse (CDC:コア密度崩壊現象)を利用した周辺粒子輸送
- 周辺ヘリウム輸送実験(九州東海大)
- ダストの3次元軌跡
- 高速掃引プローブを用いた静電揺動計測
- 放射崩壊機構
- ストキャスティック領域の不純物輸送
- ヘリウムビームプローブによる周辺計測
- 固体水素ペレットによる高密度準定常維持

$R_{ax} = 3.9 \text{ m}$ での CIV発光強度分布

- CIV ($\lambda = 384 \text{ \AA}$, $2p-3d$, $E_i = 65 \text{ eV}$)線スペクトルの発光強度を垂直方向Z-トロイダル方向Yの2次元分布として計測.
- CIVはエルゴディック層の外縁部, およびダイバータレッグのX点近傍で発光する.

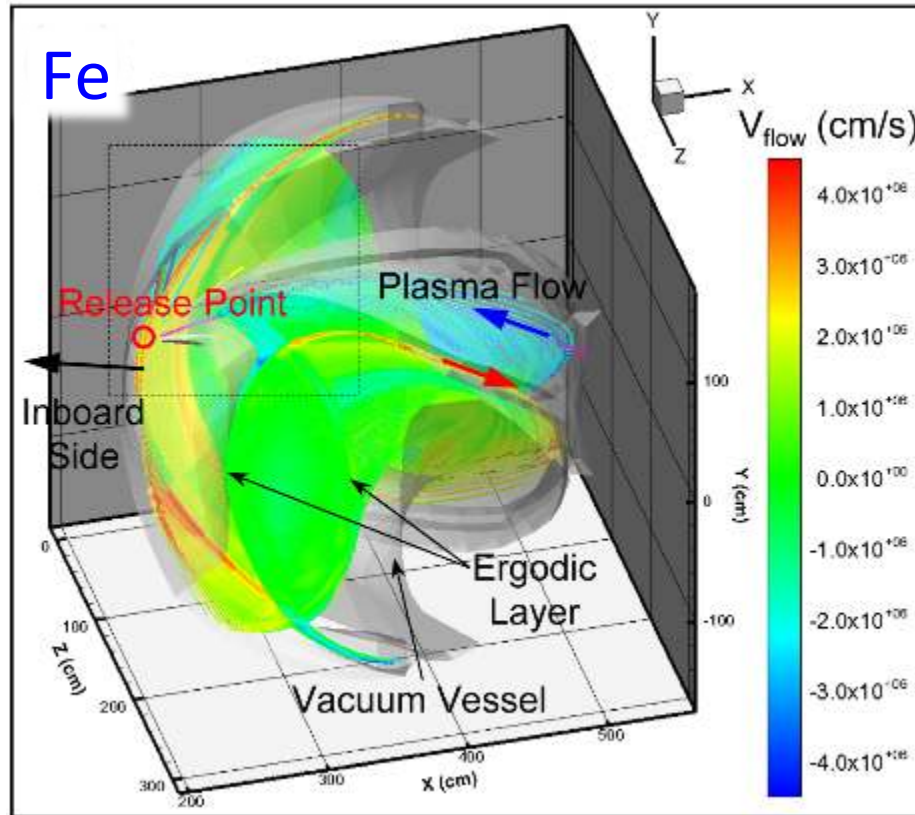


- 外側X点の軌道に沿って, 発光強度が強い軌道が2本観測された(左図点線). ダイバータ板と接続する磁力線を多く含むダイバータレッグの軌道と一致している(下図点線).

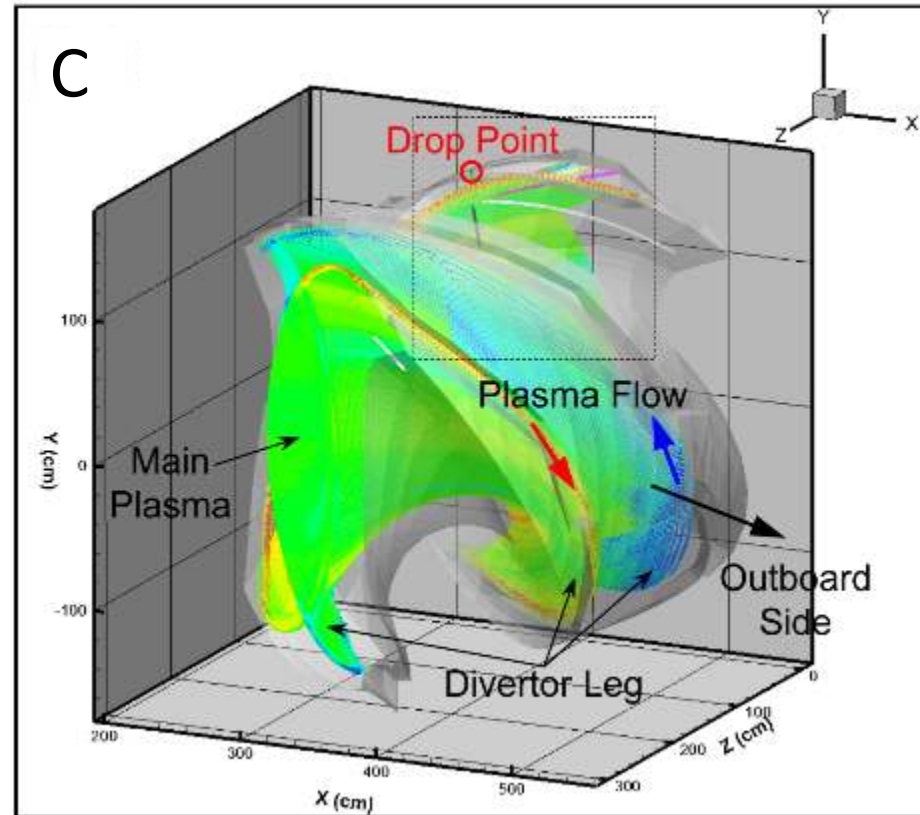


ダスト軌跡解析のための3次元モデル

Case (a)



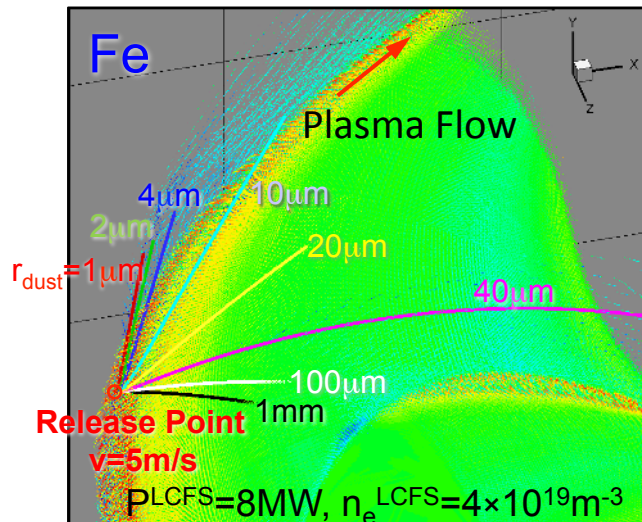
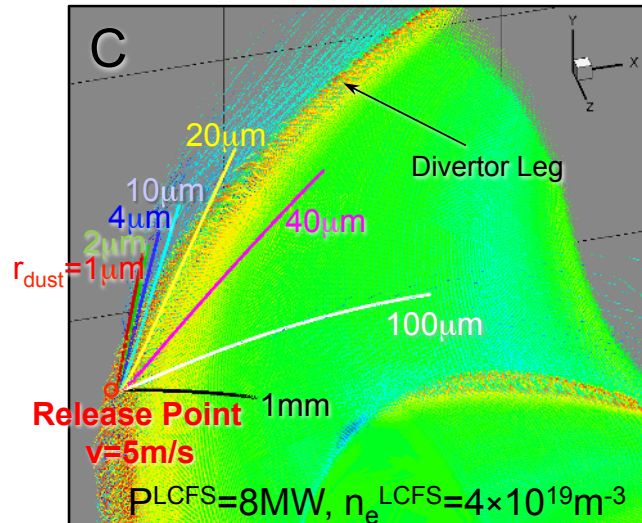
Case (b)



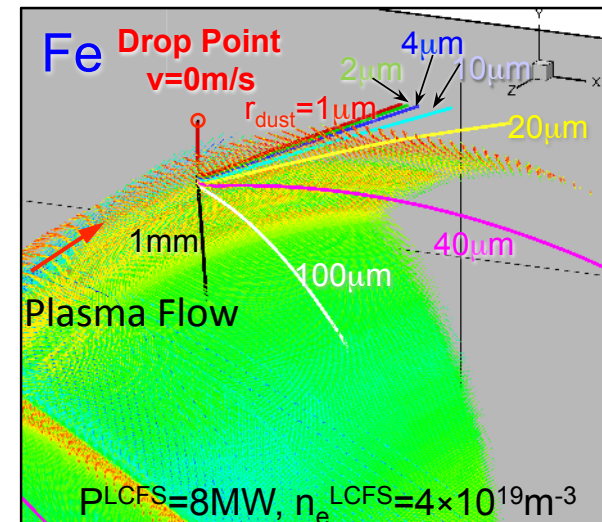
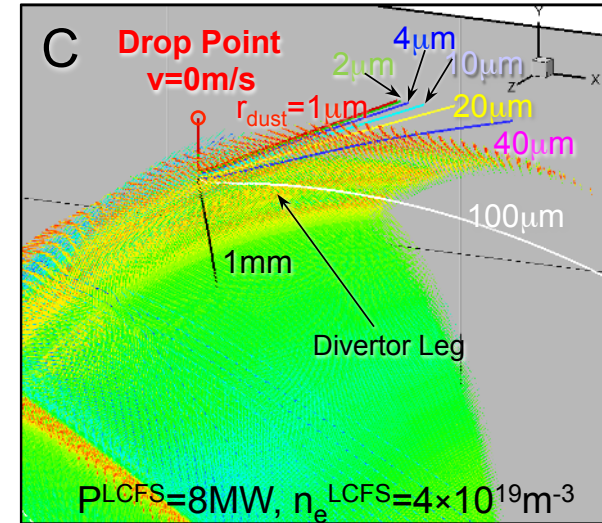
- 3次元ダスト軌跡の解析 (DUSTTコード) を以下の二つの状況で実施
- (a) 鉄イオンが上側内側ダイバータ板のストライクポイントから5 m/sの速度で放出
 - (b) カーボンが上部ポートダイバータ板から自由落下

ダスト軌跡の数値計算

Case (a)



Case (b)



小さなサイズのダストはダイバータへのプラズマフローにより掃出され、中程度のサイズでは、ダイバータレグを通過して運搬される。大きなダストは主プラズマに侵入してゆく。