

第1回プラズマ物理クラスター・スクレイプオフ層とダイバータサブクラスター会合
第3回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター会合
第1回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター会合
筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム
双方向型共同研究「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」会合

平成25年8月29－30日
つくばサイエンスインフォメーションセンター大会議室

LHDにおける周辺プラズマ・ダイバータ 実験の進展

秋山毅志
(NIFS)

LHDでの周辺プラズマ・ダイバータ実験のねらい

- 閉構造ダイバータを用いた、周辺粒子制御による高性能プラズマ生成と粒子バランスの理解
- ダイバータデタッチメントにおけるエネルギーバランスの理解と制御
- 新しいプラズマ計測の開発とそれによる周辺プラズマ輸送機構の理解、新しい物理現象の探索

第16サイクルでの実施実験テーマ

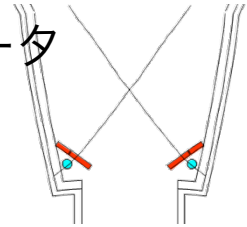
1. Physics processes at the plasma-material interface	
2. Material erosion, migration, mixing, and dust formation	
3. Plasma fuelling, particle exhaust and control, tritium retention	
ペレット粒子供給による高密度・高閉じ込め放電の達成	坂本隆一
超高密度プラズマ長時間維持放電におけるグローバル粒子バランスの評価	本島 巖
4. Wall conditioning and tritium removal techniques	
5. Impurity sources, transport and control	
X点近傍における不純物構造の密度及び磁場配位効果	森田 繁
ストキャスティック磁場による不純物遮蔽効果の定量的評価	小林政弘
6. Edge and divertor plasma physics	
閉ダイバータによる粒子制御	増崎 貴
閉ダイバータ化がLHDプラズマ周辺部の中性粒子輸送に及ぼす効果の検証とその解析	庄司 主
クライオ排気性能の評価	増崎 貴、本島 巖
LHDのポンプ機能を有した閉ダイバータでのヘリウムガス排気実験の予備的研究	御手洗 修
閉ダイバータおよび共鳴摂動磁場を用いた周辺プラズマ制御	森崎友宏
ダイバータ閉構造化がもたらすリサイクリングへの影響評価	田中宏彦
Avoidance of radiative collapse and extension of density limit by edge localized electron cyclotron heating during high density neutral beam injection discharges in LHD	Peterson Byron
Observation of evolution of radiative collapse using imaging bolometers in LHD	佐野竜一

第16サイクルでの実施実験テーマ

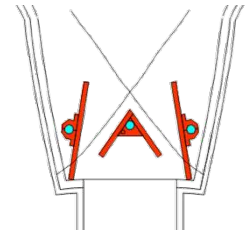
7. Power exhaust, plasma detachment, and heat load control		
完全デタッチメント実験		宮澤順一
共鳴摂動磁場を用いたデタッチメント制御		小林政弘
外部摂動磁場を用いた熱粒子負荷軽減運転の3次元性		秋山毅志、 田中宏彦
放射損失増大と放射分布の不純物ガス種依存性		秋山毅志
不純物発光位置の同定		村上 泉、鈴木千尋
デタッチ・プラズマへの不純物入射と真空紫外分光計測		舟場久芳
不純物入射放電時の放射強度分布計測		森崎友宏
ダイバータ熱負荷軽減運転のための外部摂動磁場およびプラズマパラメータの最適化		成嶋吉朗
不純物ガス入射によるダイバータ熱負荷軽減		増崎 貴
高速2次元分布計測による超音速ガスパフ中のトロイダル異方性とデタッチメント機構		村上昭義
LHD非接触プラズマ中でのプラズマブロッブ輸送現象		大野 哲靖
AXUVVDを用いた放射損失分布の高分解計測によるLHDにおけるプラズマ閉じ込め特性の研究		田村直樹
Observation of evolution of radiation localization during magnetic island induced detachment in LHD		Pandya Shwetang
8. Far SOL transport and plasma wall interaction in main chamber		
LHD周辺領域におけるPlasma Blob輸送特性の定量評価		田中宏彦
9. Plasma edge and first wall diagnostics		
10. Plasma exhaust and plasma material interaction for fusion reactor		

LHDでのダイバータ閉構造化の進展

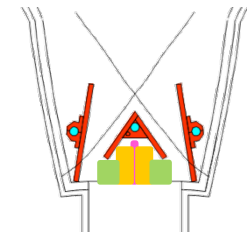
従来の開いたダイバータ



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

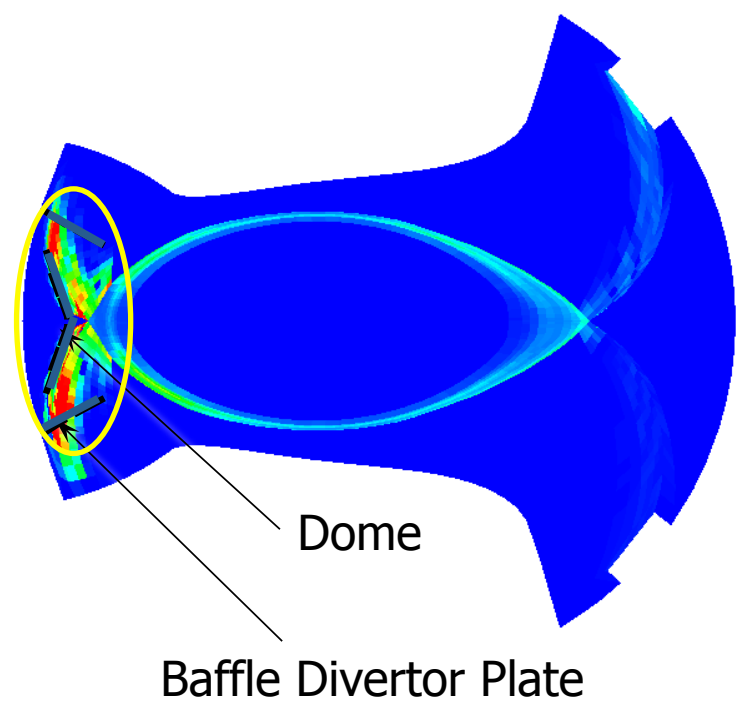


2012年
排気装置を備えた閉構造ダイバータの設置 (**トロイダル6セクション**)
トロイダル1セクションの排気装置を稼働

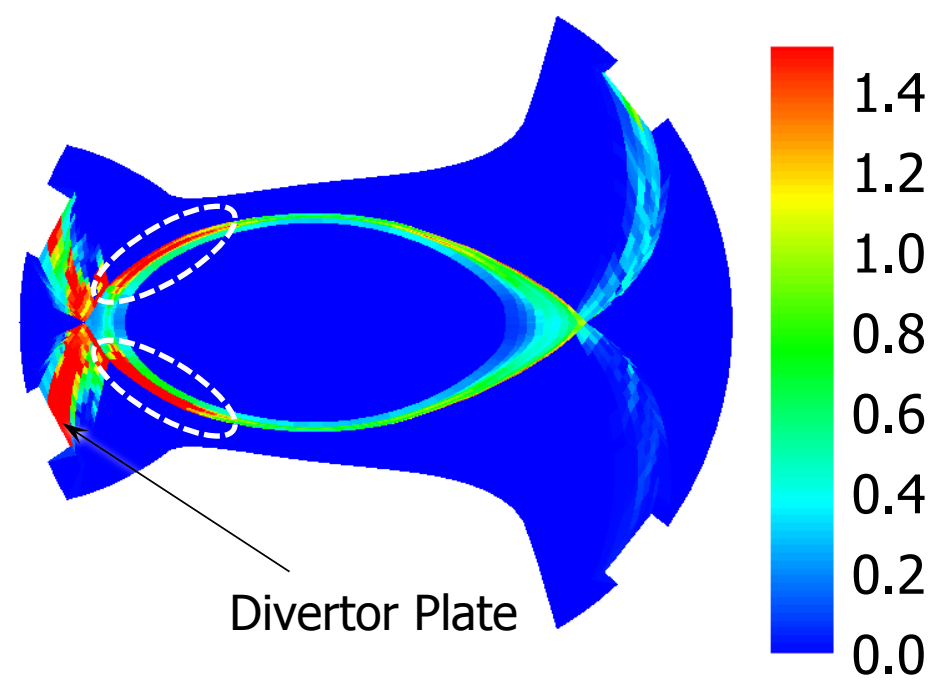


閉構造化の効果: 中性粒子挙動

閉構造ダイバータ



従来のダイバータ $\epsilon_{H\alpha}$ ($\times 10^{15}$ eV/cm²/str)



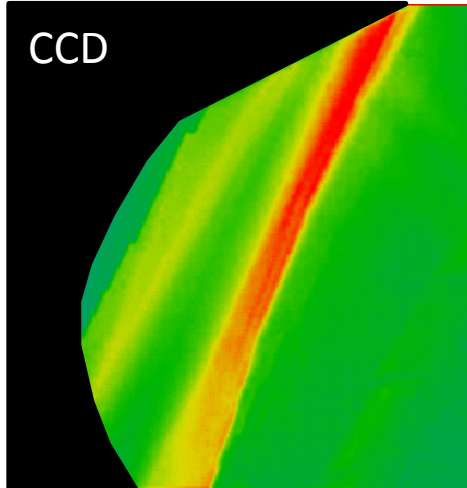
閉構造化により、周辺プラズマでのH α の発光分布が変わることが予測された。

閉構造化の効果: $H\alpha$ 発光分布の変化

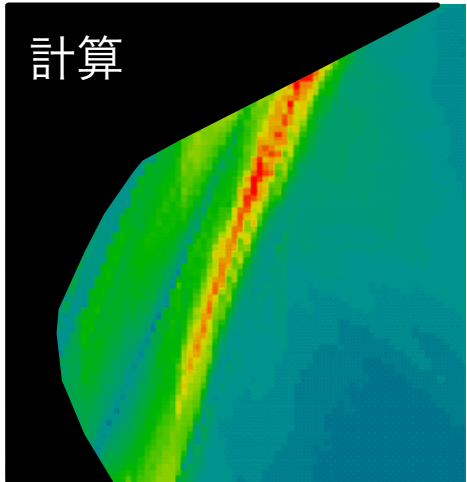
60ポートから6Iダイバータ(2011年はオープンダイバータ、2012年はクローズドダイバータ)を見込む視野で、 $H\alpha$ の発光分布をシミュレーションとCCD画像とで比較した。

クローズドダイバータ
(2012年)

CCD

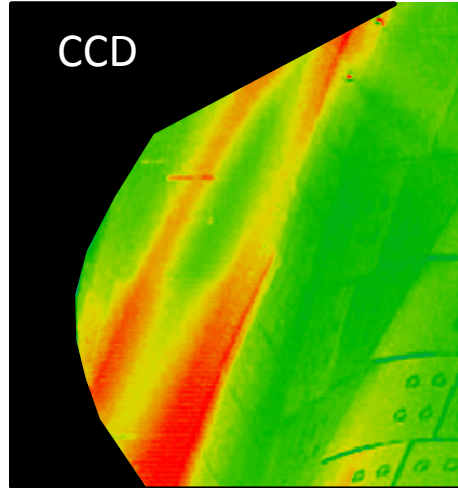


計算

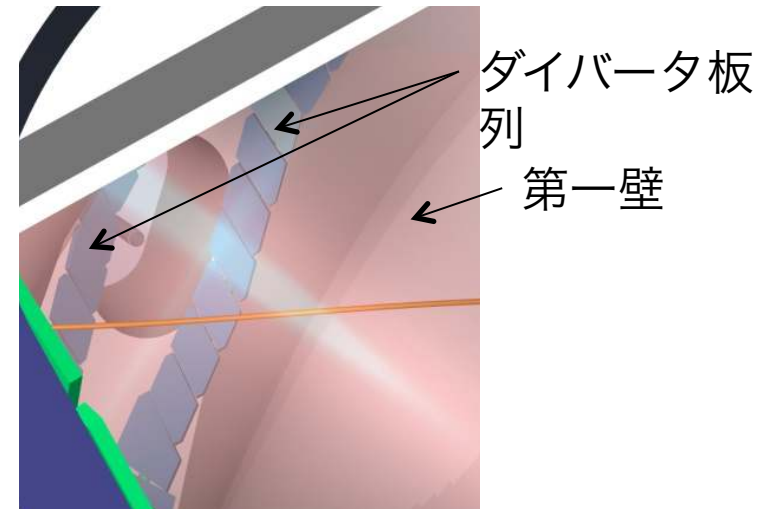
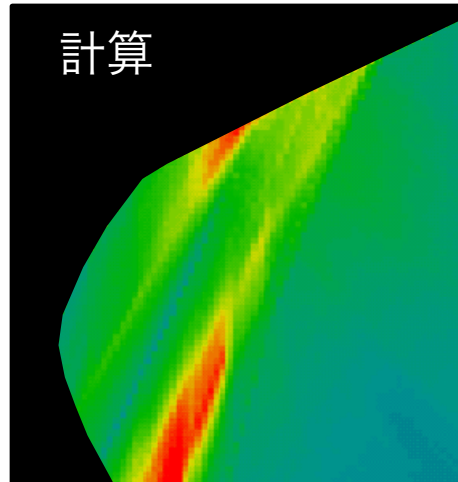


オープンダイバータ
(2011年)

CCD



計算



CCDカメラの視野

計算で予測された特徴を実験で観測

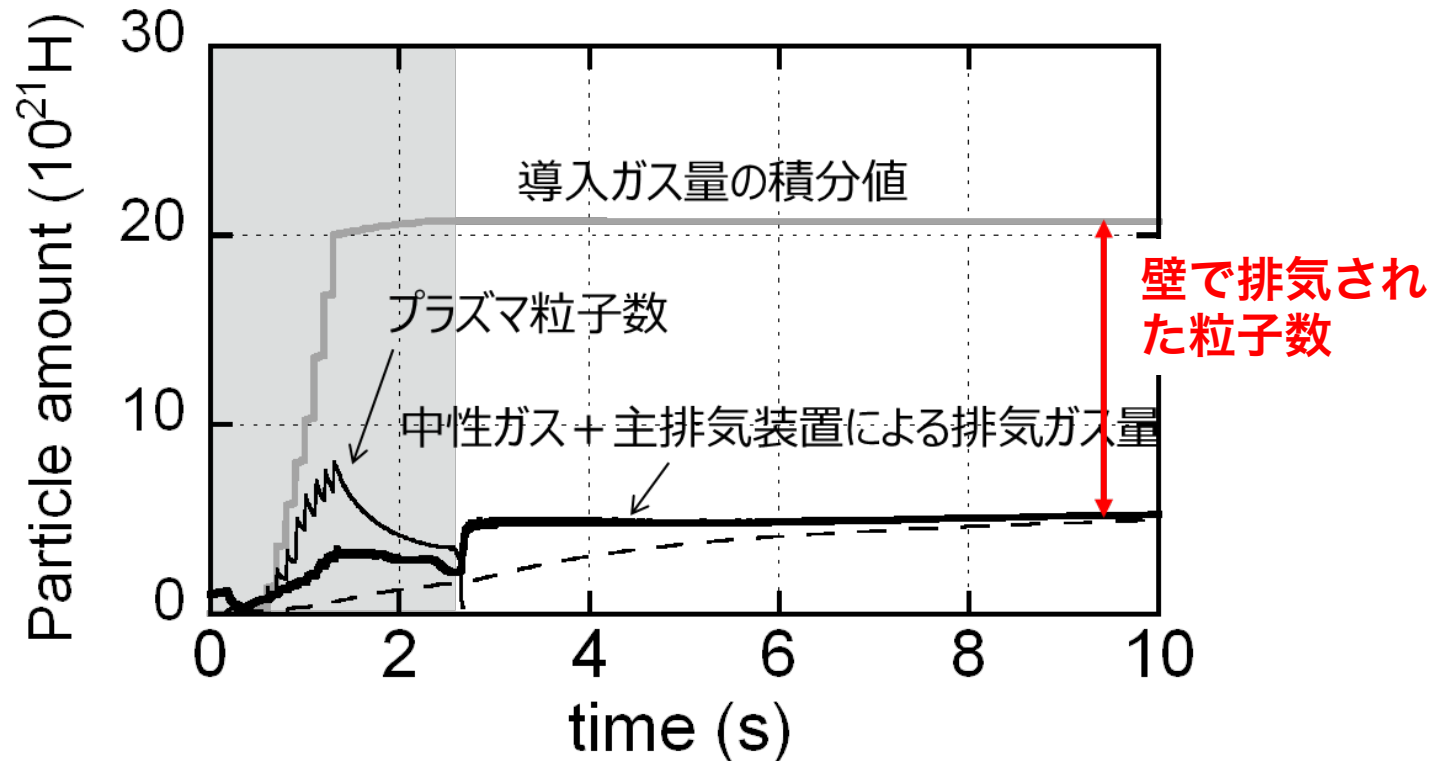
↓
閉構造化により中性水素原子がダイバータ部に閉じ込められていることが確認できた

ダイバータ排気の効果：排気の目標性能

目標とする性能（完成時）

排気粒子束 1×10^{22} atoms/s

- ペレットで持ち込む粒子数
- LHDの壁排気
に相当



典型的なペレット入射放電における粒子バランス

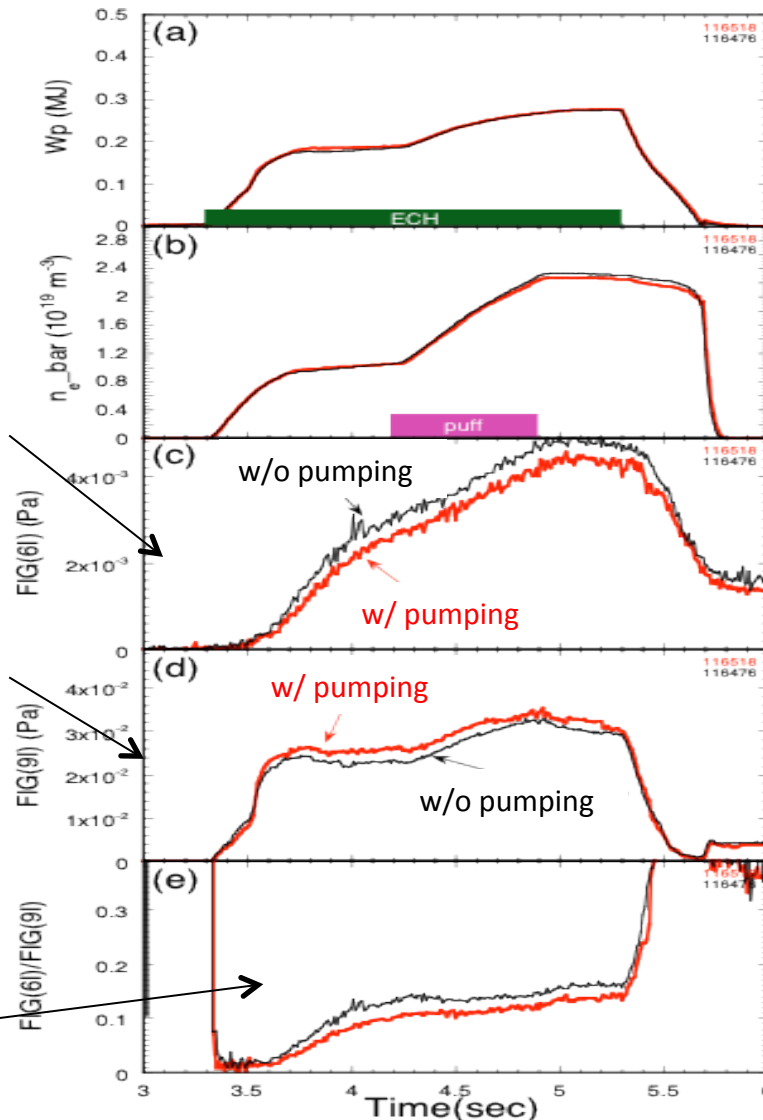
ダイバータ排気の効果：中性粒子圧力

ECH加熱放電中のダイバータ部中性粒子圧力に効果を観測

排気装置のあるダイバータ部(#6)の中性粒子圧力

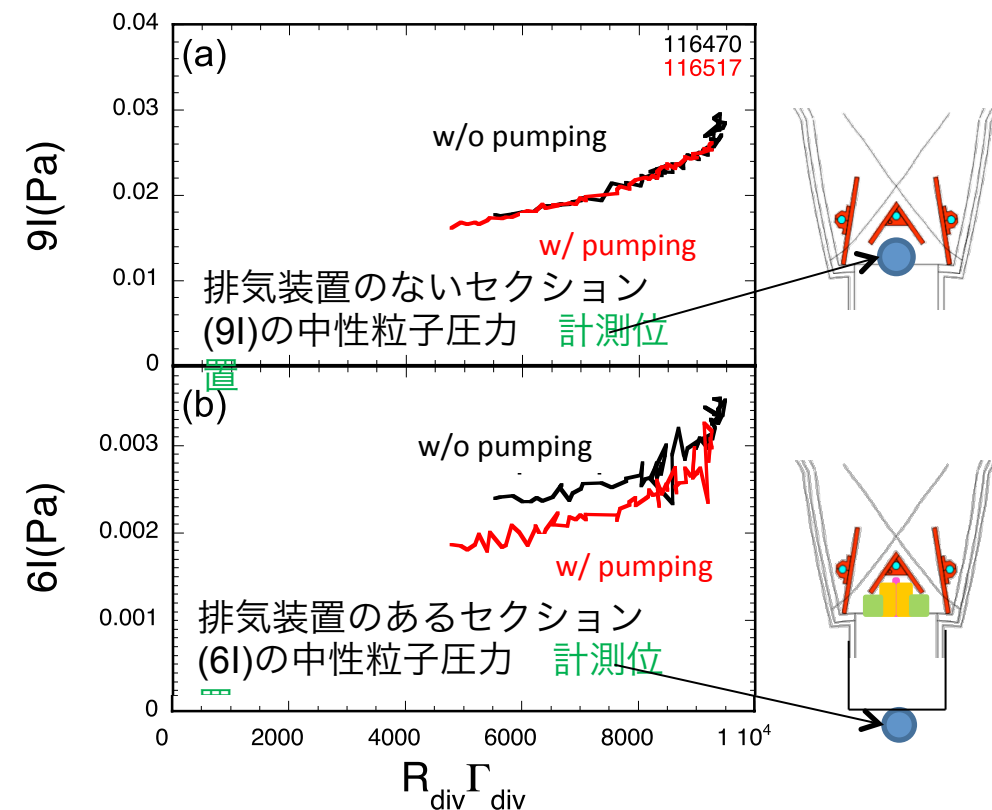
排気装置の無いダイバータ部(#9)の中性粒子圧力

ダイバータ排気を稼働した場合、#6/#9が小さくなる



- 主プラズマのパラメータが同程度のECH加熱放電中のダイバータ部中性粒子圧力で、ダイバータ排気の効果を観測した。

ダイバータ排気の効果:リサイクリング粒子束への依存性



$$\frac{dN_e}{dt} = \Phi_{puff} + \Phi_{NB} - (1 - R_{div})\Gamma_{div}$$

$$R_{div}\Gamma_{div} = \Gamma_{div} - \Phi_{puff} + \Phi_{NB} - \frac{dN_e}{dt}$$

粒子バランス解析から、リサイクリング粒子束 ($R_{div}\Gamma_{div}$) を評価

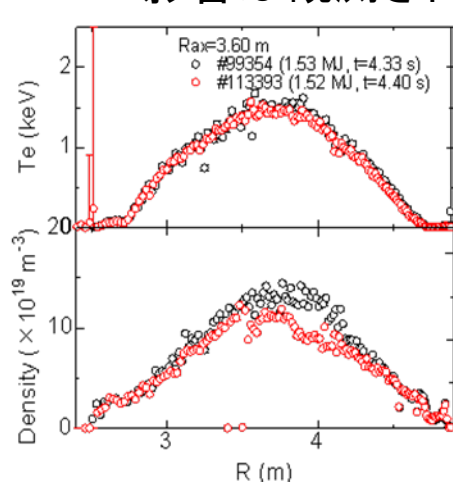
$R_{div}\Gamma_{div}$ が比較的低い場合にダイバータ排気の効果でダイバータ部の中性粒子圧力が下がることを観測。

リサイクリングが大きい条件では排気の効果が見えにくい可能性がある。

なぜリサイクリング条件によってダイバータ排気の効果の現れ方が変わるのか、検討中

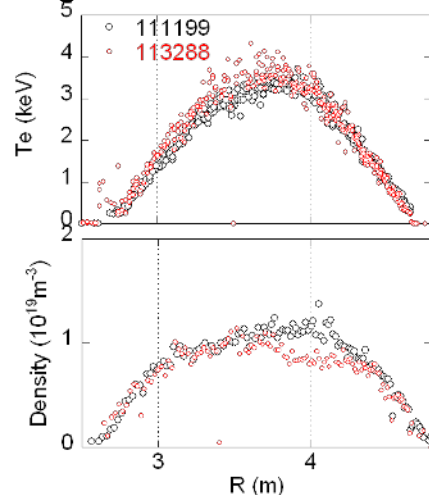
グローバルパラメータへの影響

現在のところ、グローバルなプラズマパラメータに、閉構造化、ダイバータ排気の影響は観測されていない

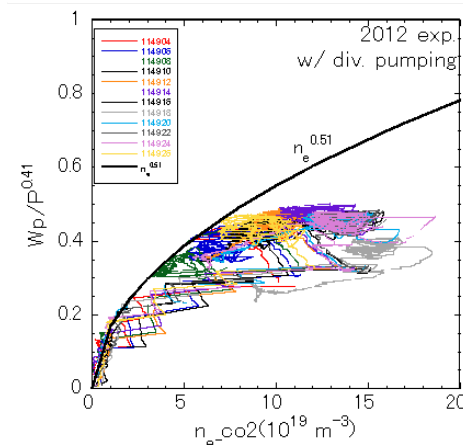
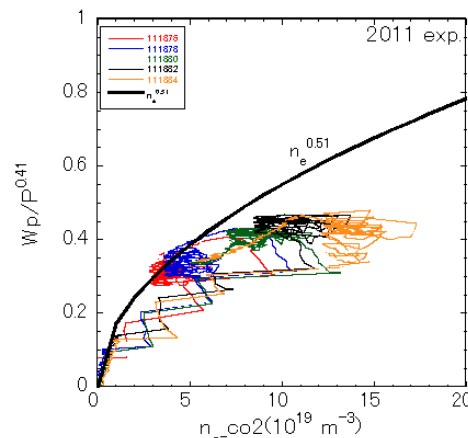


高密度放電 (ペレット入射)

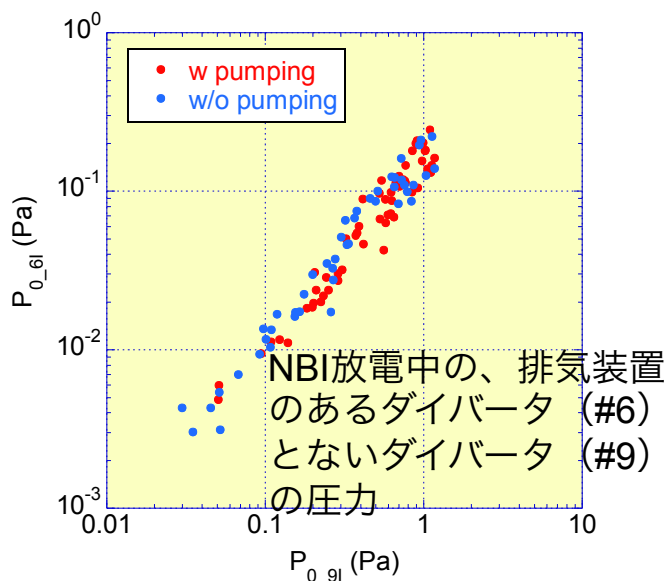
電子密度・温度分布 ○: 2011年実験 ○: 2012年実験



低密度放電



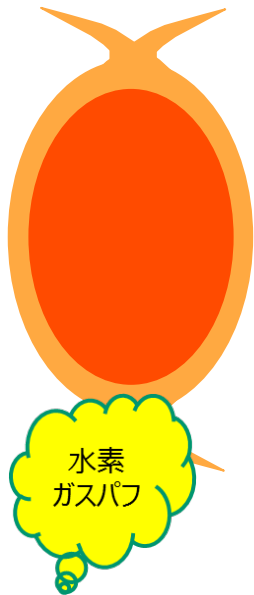
閉じ込めISS95閉じ込めスケーリングとの比較 (ペレット入射放電)



- 現在のところ、グローバルなプラズマパラメータに、閉構造化・ダイバータ排気の影響は観測されていない
 - 2013年度に閉構造ダイバータを増設し、さらにダイバータ排気を行うセクションを3セクション増やして影響を観測する
- NBI放電中にはダイバータ排気の局所的な影響が観測されていない
 - リサイクリング条件への依存性の観点から原因を検討中

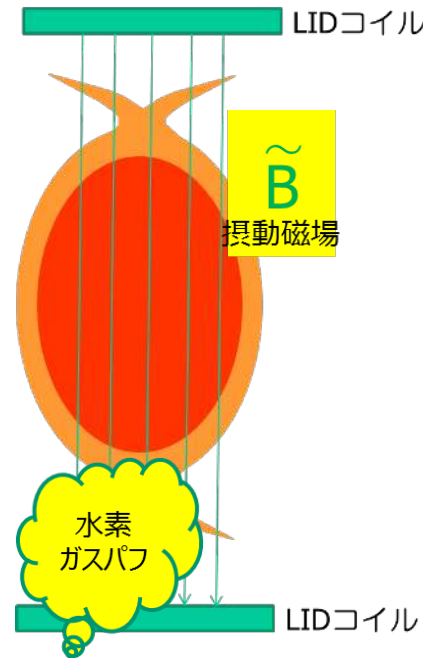
LHDでのダイバータ熱負荷軽減運転

サーパンスモード



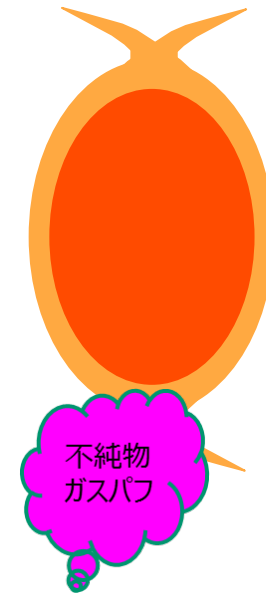
- ・ 高密度 ($>10^{20} \text{ m}^{-3}$)
- ・ 回転放射体（サーパンス）を観測
- ・ 磁場配位依存性

摂動磁場印加による磁気島形成



- ・ 高密度 ($>6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)
- ・ 磁気島サイズ依存性
- ・ 磁場配位依存性

不純物パフ入射



- ・ 低密度から高密度まで
- ・ 主プラズマへの不純物混入
 - ・ ネオン、アルゴン、窒素

LHDでのダイバータ熱負荷軽減運転

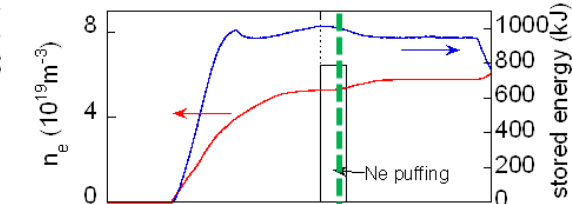
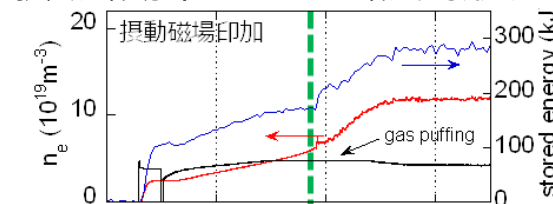
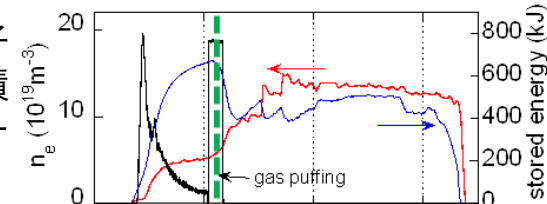
現象論的には、3つの運転で、加熱電力に対する放射損失割合とダイバータ熱負荷軽減度合いは同程度

サーパンスモード

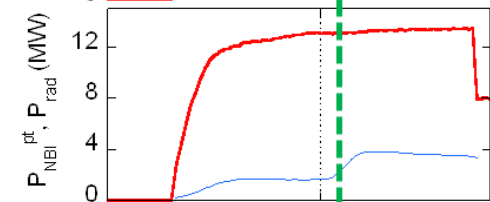
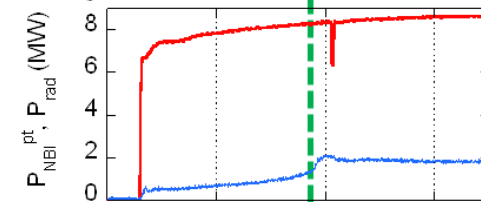
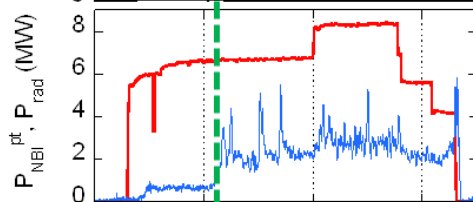
摂動磁場印加による磁気島形成

ネオンパフ

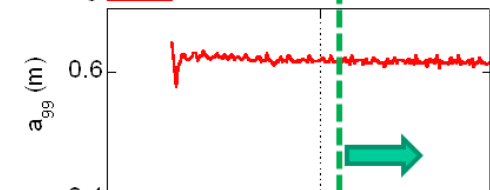
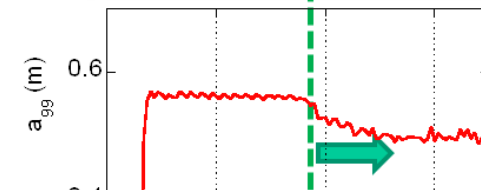
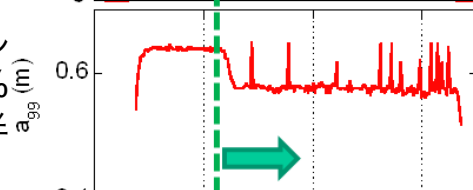
線平均電子
密度と蓄積
エネルギー



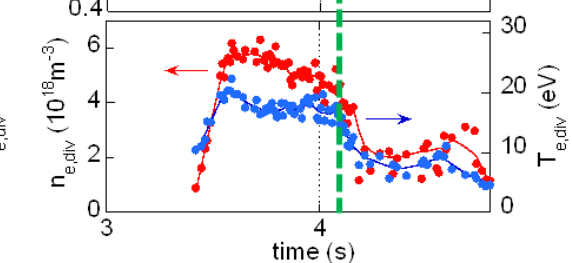
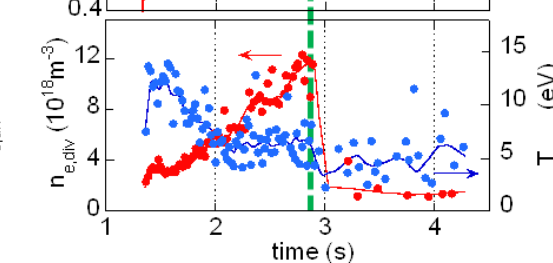
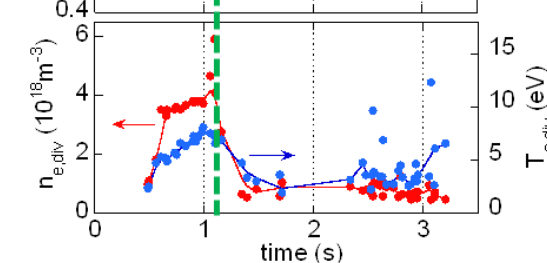
加熱パワ
と放射損
失



蓄積エネ
ルギーの99%
がある小半
径



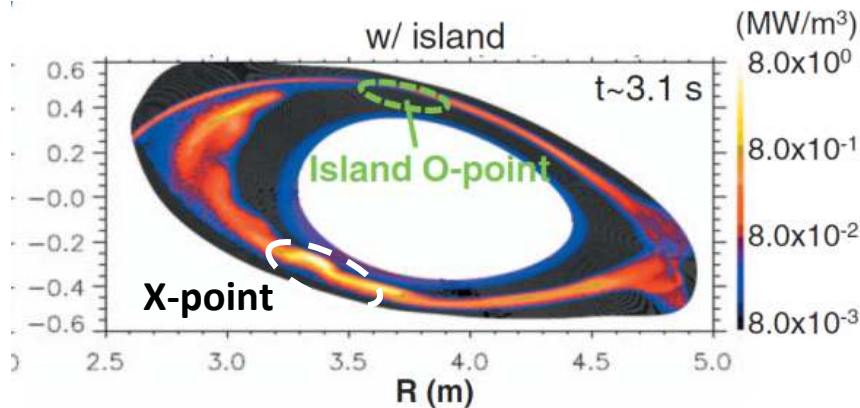
ダイバー
タ部電子
密度・温
度



- 放射損失割合：いずれも30%程度
- ダイバータ熱流束：いずれも数分の1から10分の1程度
- プラズマ小半径：サーパンスモードと摂動磁場印加ではシュリンク。ネオンパフでは変化なし。

LHDでのダイバータ熱負荷軽減運転(摂動磁場印加)

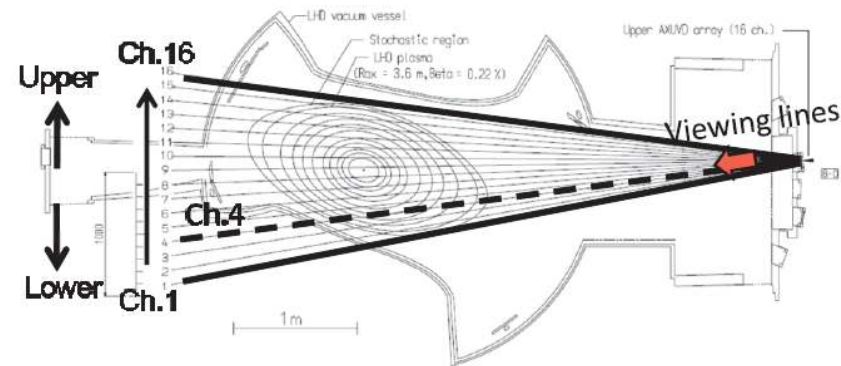
共鳴摂動磁場コイルにより、 $n/m=1/1$ の
磁気島を最外殻磁気面外側に生成



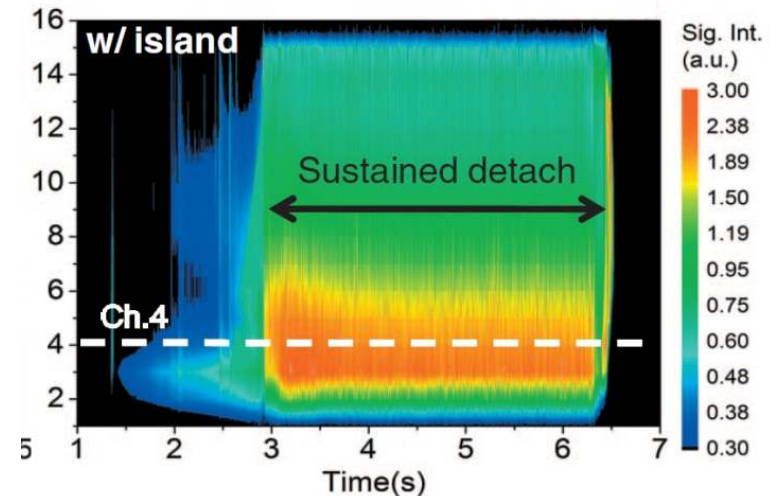
放射損失が大きい状態に遷移
Xポイントへの放射領域の局在
放射領域の安定保持

- 放射損失の増大(2倍程度)
- 受熱板への熱・粒子負荷減少(1/3~1/10)
- 閉じ込めの劣化なし
- 密度、摂動磁場強度による能動的制御が可能

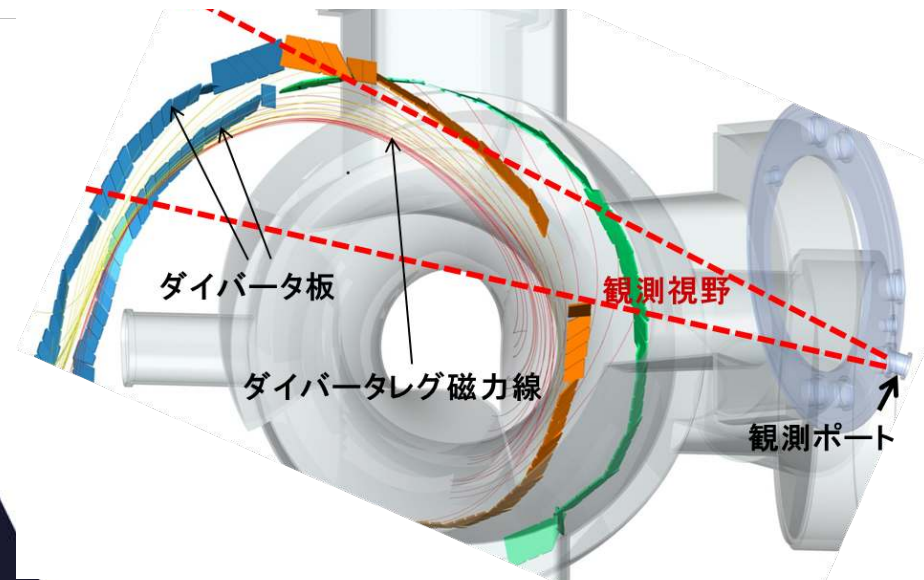
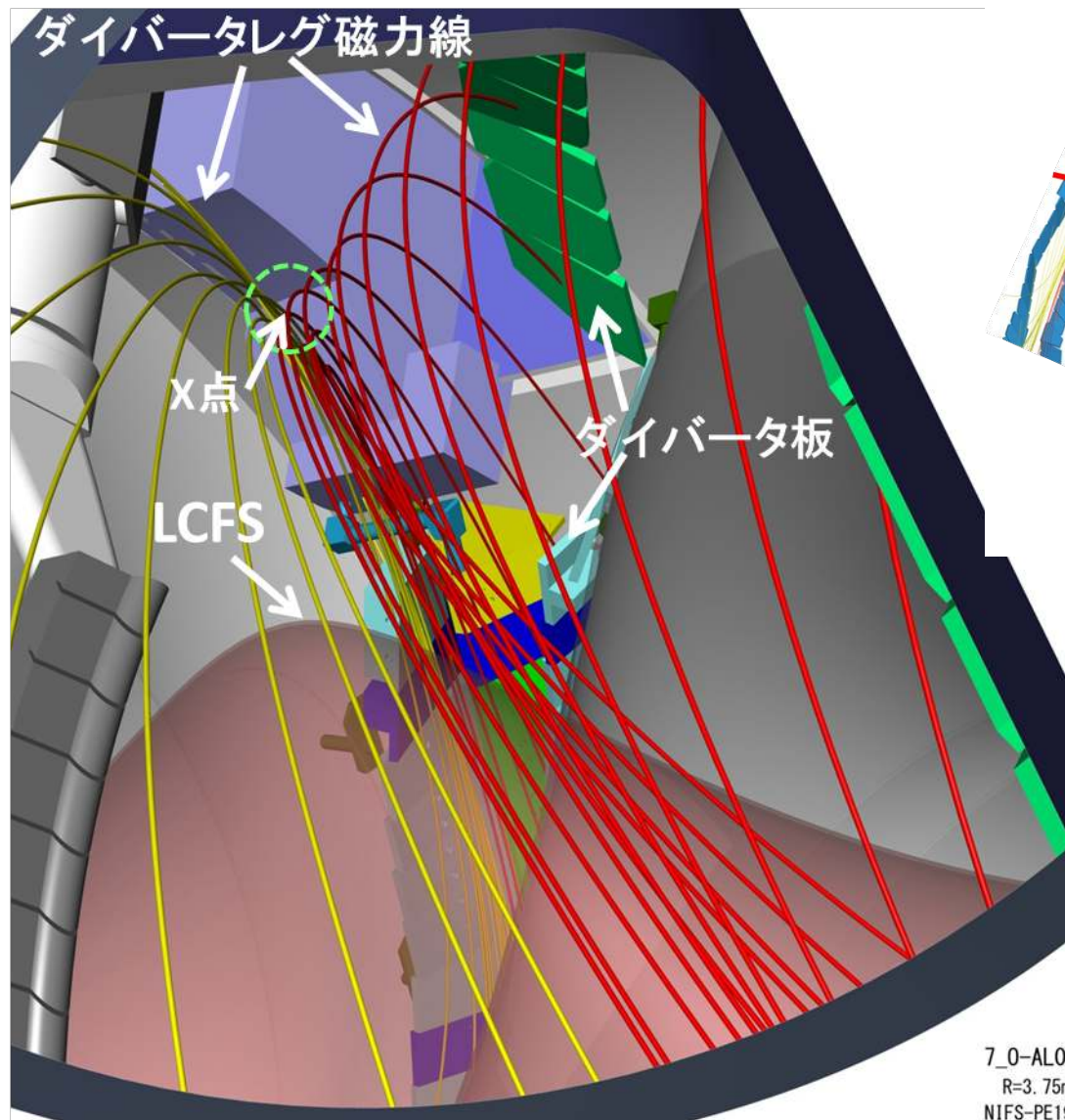
AXUVDの視線



発光強度分布の時間変化



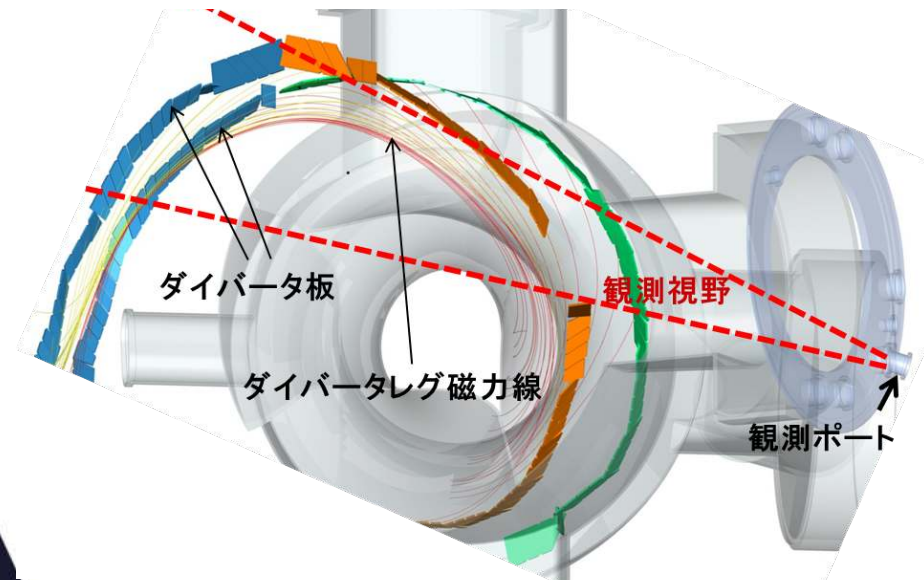
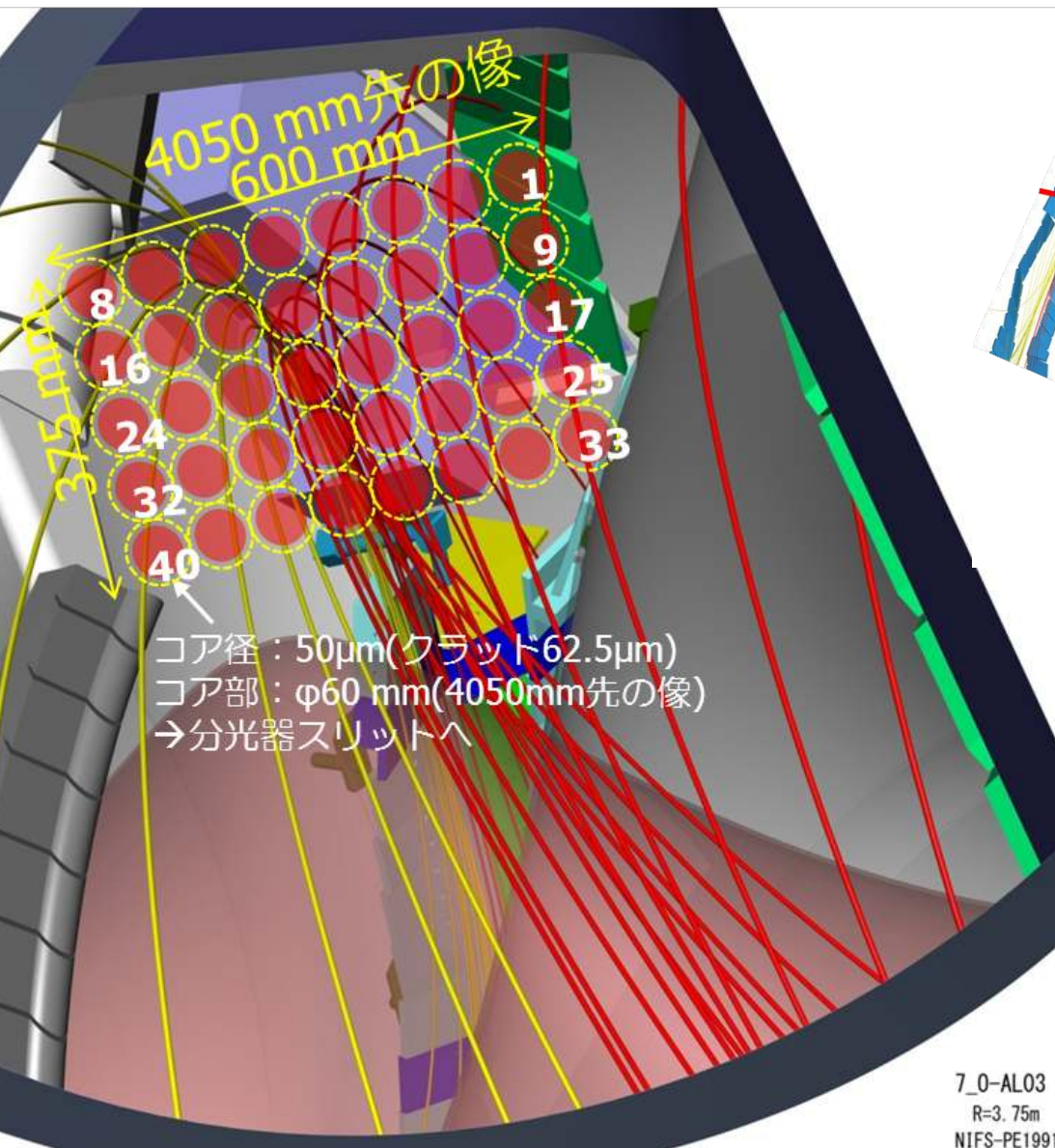
ダイバータプラズマの2次元分光



トーラス外側水平ポートから、トーラス内側ダイバータ上部を見込む視線で、2次元ファイバアレイを用いた分光系を設置した。

7_0-AL03
R=3, 75m
NIFS-PE19

ダイバータプラズマの2次元分光

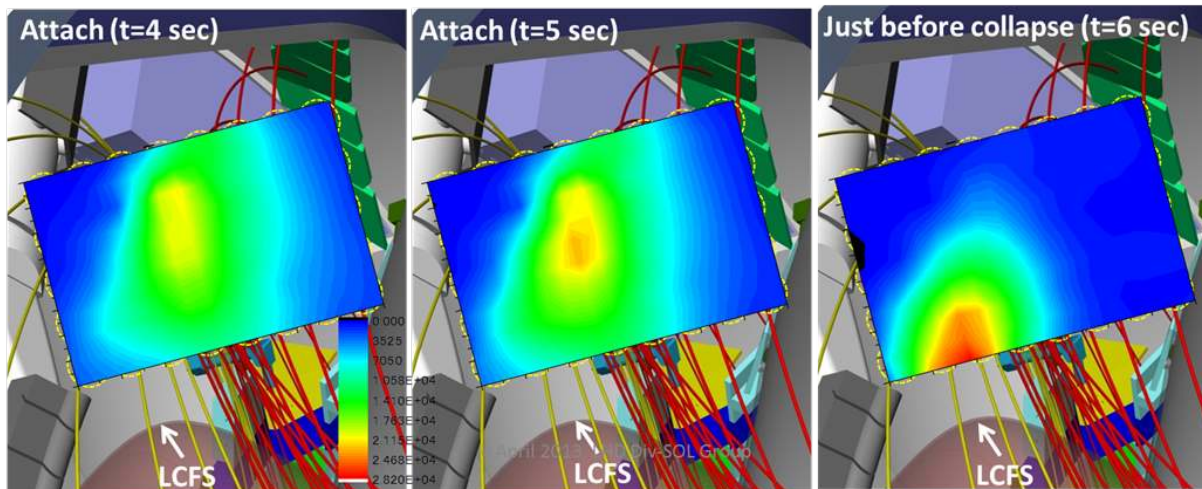


トーラス外側水平ポートから、トーラス内側ダイバータ上部を見込む視線で、2次元ファイバアレイを用いた分光系を設置した。

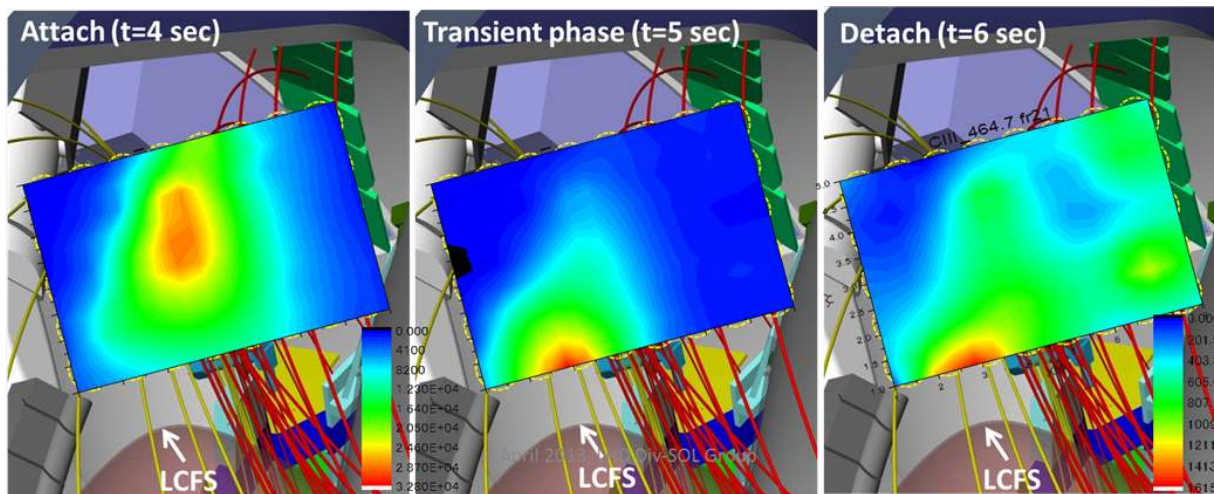
ファイバー: 40ch
波長範囲: 200 ~ 1000 nm

炭素発光分布の時間変化(摂動磁場印加デタッチメント)

炭素発光(CIII 464.7 nm)分布を観測



摂動磁場なし
-放射損失は密度の上昇とともに増加しながら、上流 (LCFS の方向に) へ徐々に移動。

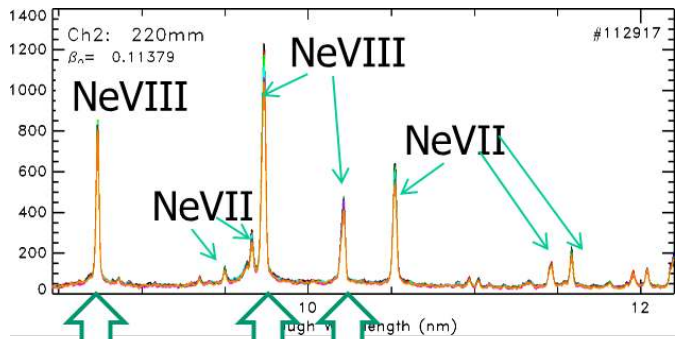


摂動磁場あり
- アタッチ時：CIIIはダイバータレグのX点付近に集中している。
- デタッチ時：LCFSにより近い上流側に移動。摂動磁場なし時に比べて発光領域が広いが、発光強度は一桁減少。

発光分布変化の機構については現在検討中

ネオンパフ実験時の発光位置

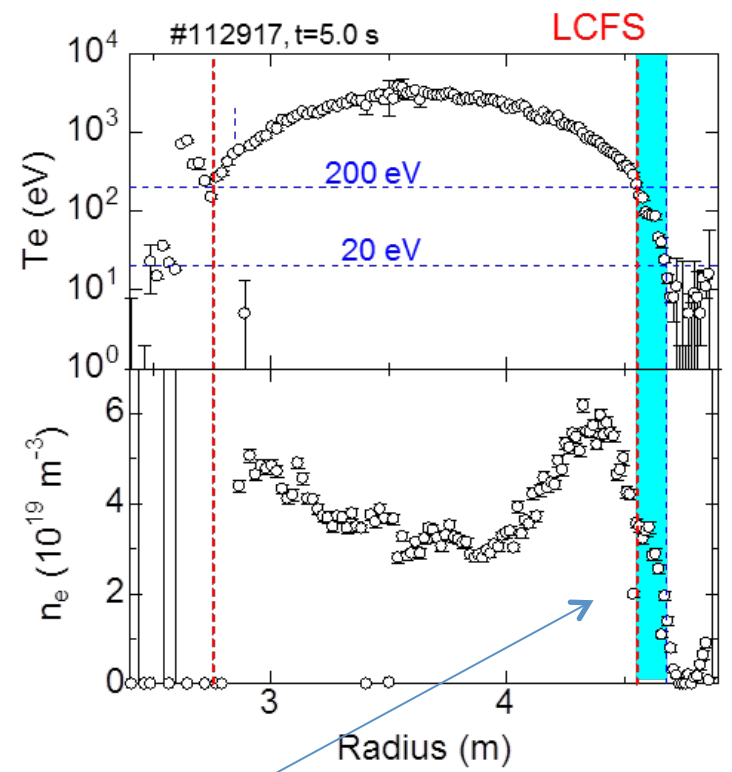
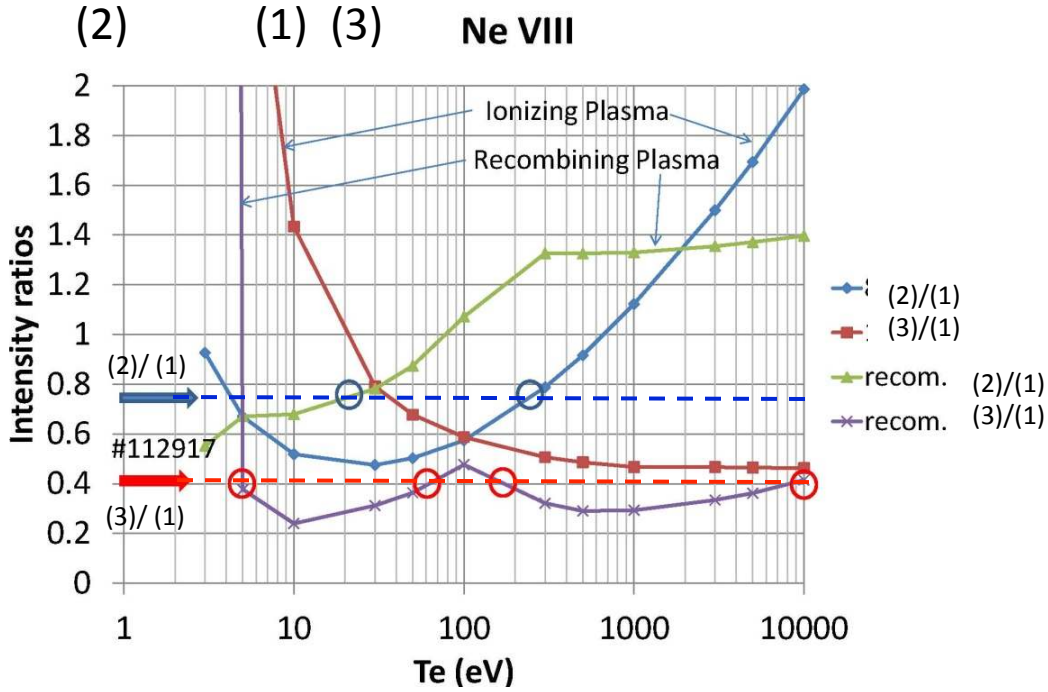
ネオンパフ実験における真空紫外分光データによる
ネオンの発光領域分析



Ne VIII (1) 2p – 3d 9.8nm
Ne VIII (2) 2s – 3p 8.8nm
Ne VIII (3) 2p – 3s 10.3nm

#112917
(2)/(1)=0.75
(3)/(1)=0.40

温度依存性を持つ、ラインの
強度比(2)/(1), (3)/(1)を利用



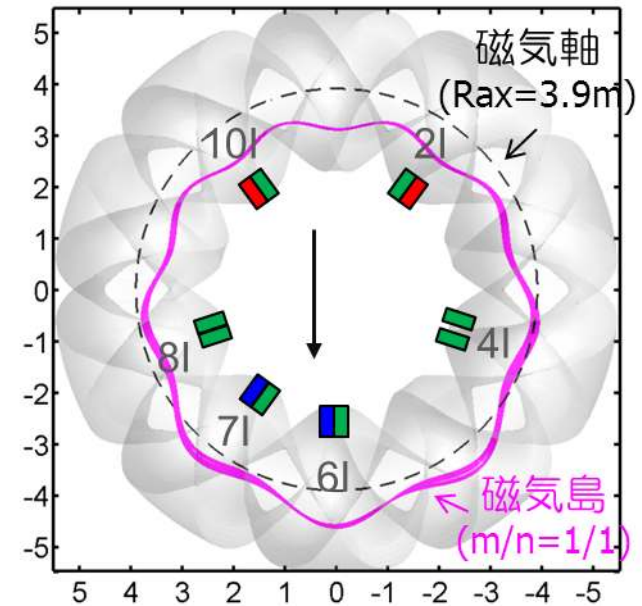
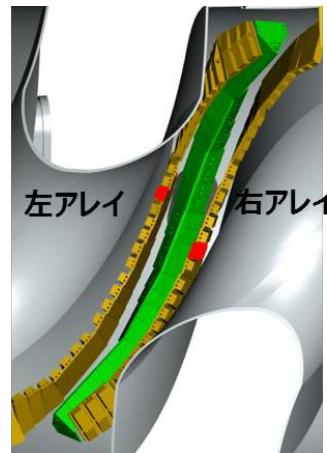
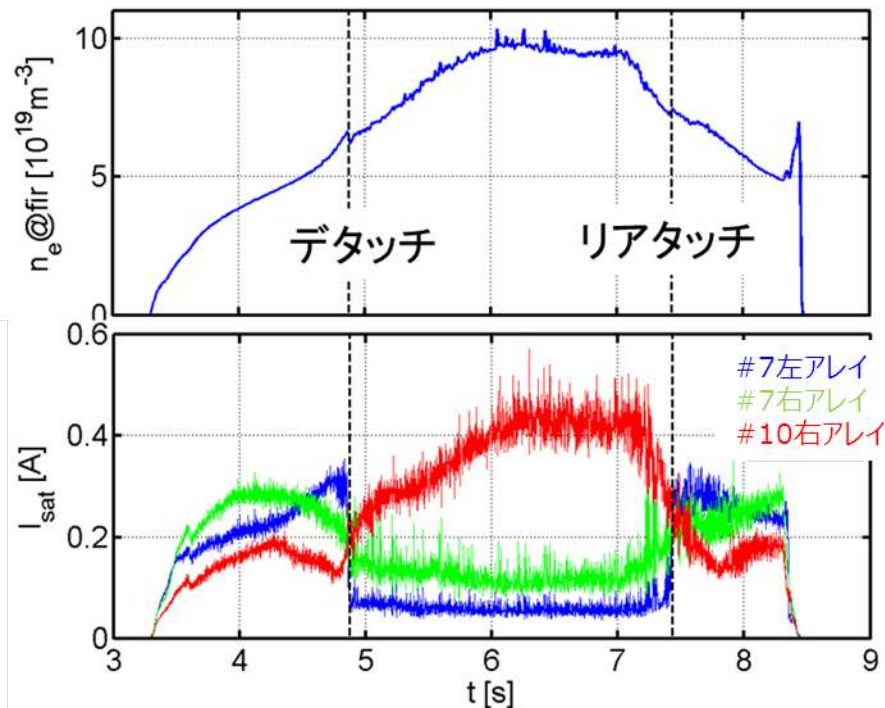
最外殻磁気面外側領域

電離進行プラズマ成分のみでは計測値の説明が難しい。
→ 電離非平衡状態。Te ~ 20-200eVの間で光っていると考えら

トロイダル異方性: 摂動磁場印加デタッチメント

新設計測: ダイバータ板上静電プローブアレイをトロイダル7セクションに設置

ダイバータ粒子束挙動にトロイダル異方性を観測



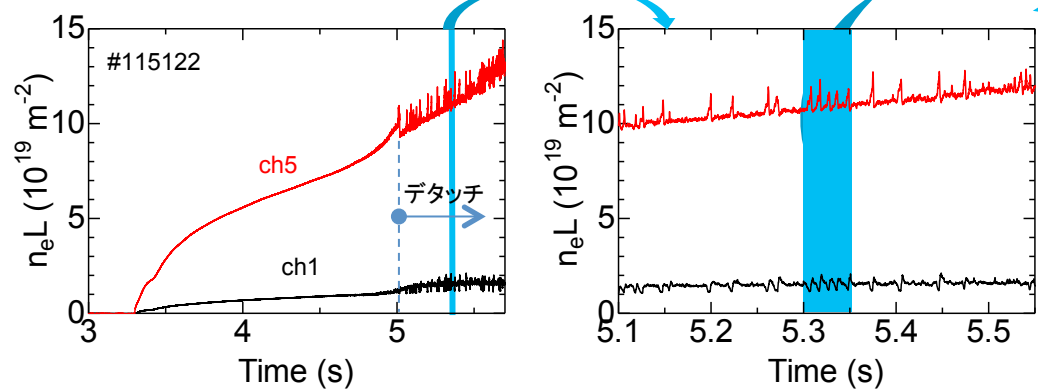
青...急峻な減少
緑...緩やかな減少
赤...緩やかな増加

トロイダル静電プローブアレイのダイバータフラックスの時間変化 (閉ダイバータ、ほぼ赤道面位置)

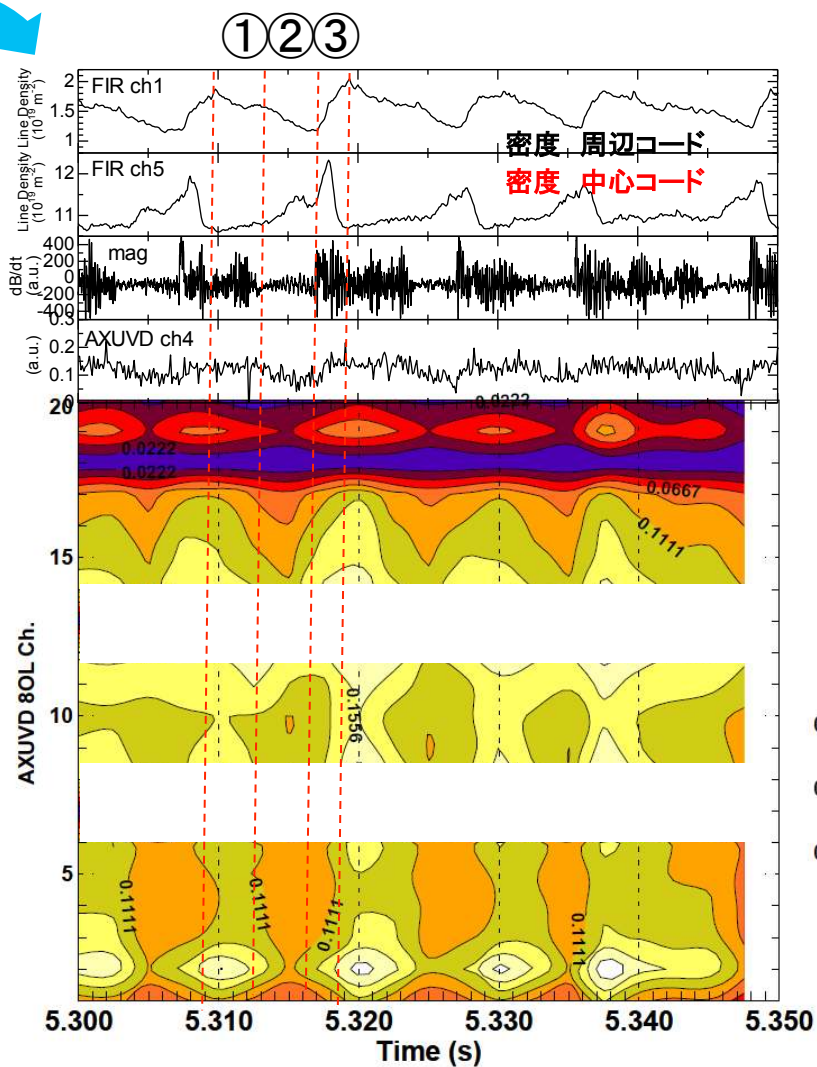
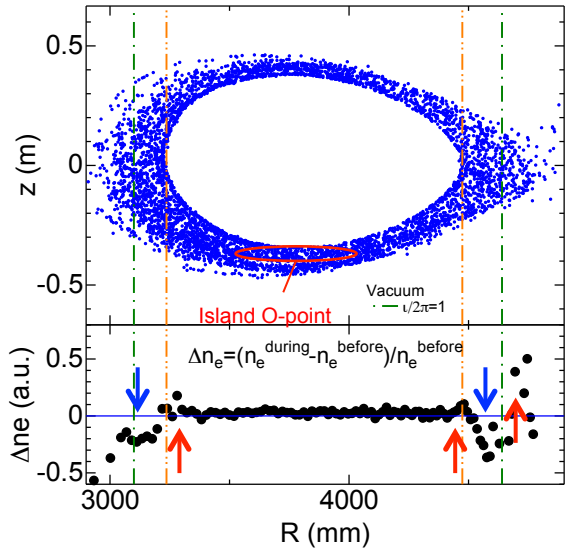
- “デタッチ” 遷移時のダイバータ粒子束挙動にトロイダル異方性を観測した。
- 摂動磁場による磁気島形成で、ダイバータ磁力線構造にトロイダル異方性が生じたためか？

摂動磁場印加デタッチメント中のバースト現象

デタッチ中のバースト現象



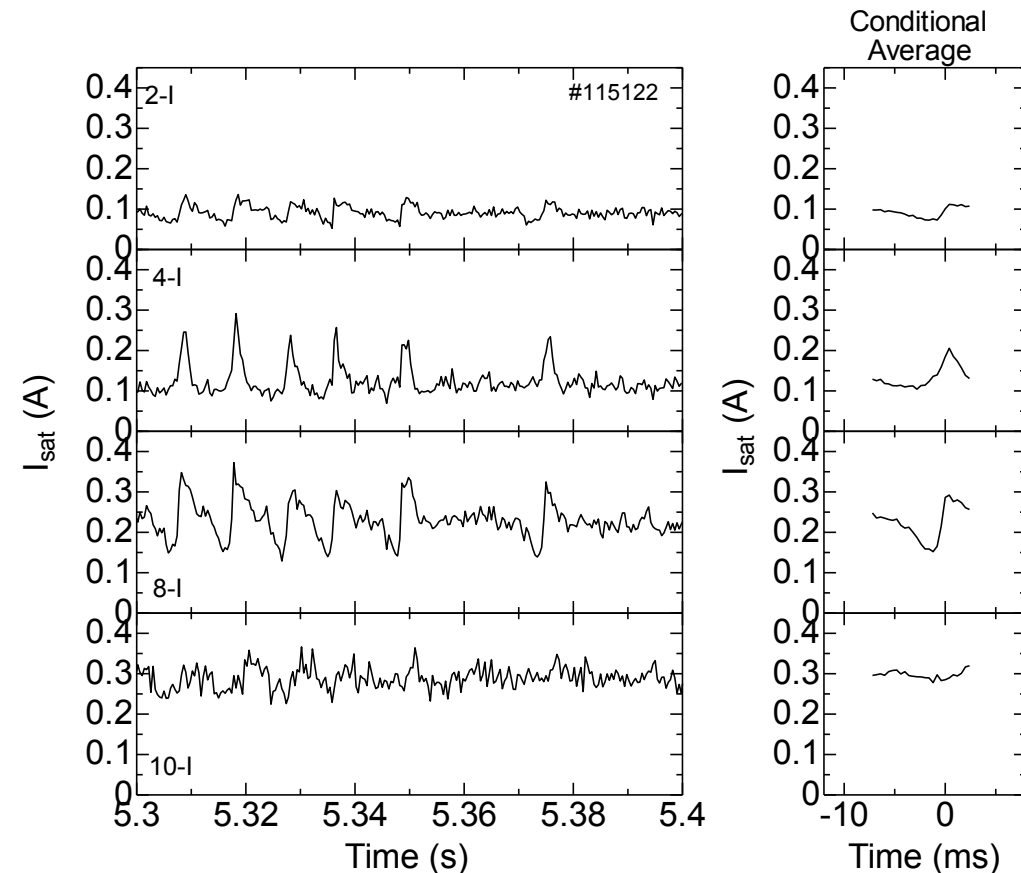
バースト前(①)に対するバースト成長中(②)の密度分布の差分



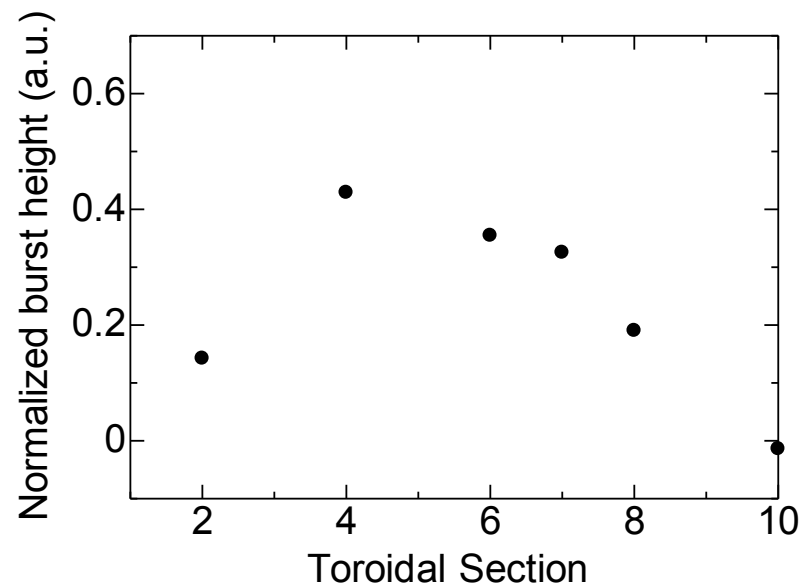
- ① 放射損失が大きい状態。磁場揺動も大。
- ② 放射損失が減少、周辺密度が減少(LCFS近傍とその内側では密度増)、磁場揺動の急激な減少
- ③ 急に磁場揺動が増加し、周辺領域で密度増。再び放射損失が増大

トロイダル異方性:バースト

ダイバータ板上静電プローブアレイ



平均的なイオン飽和電流で規格化した
バースト高のトロイダル分布



密度の吐出し現象も $n=1$ の構造を持ち、摂動磁場による
周辺磁力線構造の異方性を反映していると考えられる

- LHDでは2012年に閉構造ダイバータはトロイダル6セクションとなり、トロイダル1セクションで排気装置を稼働させた。
 - シミュレーションで予測した特徴を反映する $H\alpha$ 発光分布を、CCDカメラで観測した。
 - 中性水素原子が閉構造化によりダイバータ部に閉じ込められていることを確認した。
 - ダイバータ粒子束が比較的低い場合(低密度放電)にダイバータ排気の効果でダイバータ部の中性粒子圧力が下がることを観測。
 - 現在のところ、グローバルなプラズマパラメータに、閉構造化、ダイバータ排気の影響は観測されていない
- LHDでは、サーパンスモード、摂動磁場印加放電、不純物パフ放電の3つのダイバータ熱負荷軽減実験を行っている。
 - 分光計測により、炭素や不純物の発光分布や時間変化を明らかにしつつある。
 - 摂動磁場印加によるデタッチメント遷移時には、ダイバータ粒子束挙動や密度バースト現象はトロイダル異方性を持つ。

第17サイクルでの計画

- 稼働する排気装置がトロイダル4セクションに増えることによる効果を調べ、粒子バランス解析を行う。
 - 排気速度評価
 - 粒子バランスの評価、グローバルに与える影響
- 不純物パフ入射放電において、放射損失計測及び分光計測の充実と、原子分子グループとの共同による各不純物の放射位置・量の定量評価を行う。
- 不純物パフ入射放電において、窒素、ネオン、アルゴン、キセノン、クリプトンの入射を行い、入射する不純物によるプラズマ挙動の違いを明らかにする。
 - 高Z不純物入射、低Z & 高Z不純物の組み合わせ(放射損失増大を期待)
 - 各不純物の原子分子過程、壁リサイクリングとの関係
- 摂動磁場印加による放射損失増大状態への遷移と、磁気島ダイナミクスや周辺磁場構造との関連を探る。またボロメータアレイ・AXUVDアレイ及びダイバータ干渉計・静電プローブを用いて、放射損失分布とダイバータ熱負荷軽減効果の3次元構造を明らかにする。
 - シミュレーション(EMC3-EIRIEN)と実験の比較
 - 遷移機構の解明
 - エネルギーバランスの評価
- ペレット入射時の溶発過程、密度分布形成過程の理解を得る。