



LHDにおけるダイバータ研究

増崎 貴
核融合科学研究所



LHDのダイバータ実験

LHDにおけるダイバータ実験

燃料及び不純物粒子排気による周辺プラズマ制御



プラズマ閉じ込め改善

ダイバータ熱・粒子負荷の軽減手法の開発



高加熱入力長時間放電の達成
ヘリカル炉ダイバータ設計

2010年度実験でヘリカルダイバータを一部改造

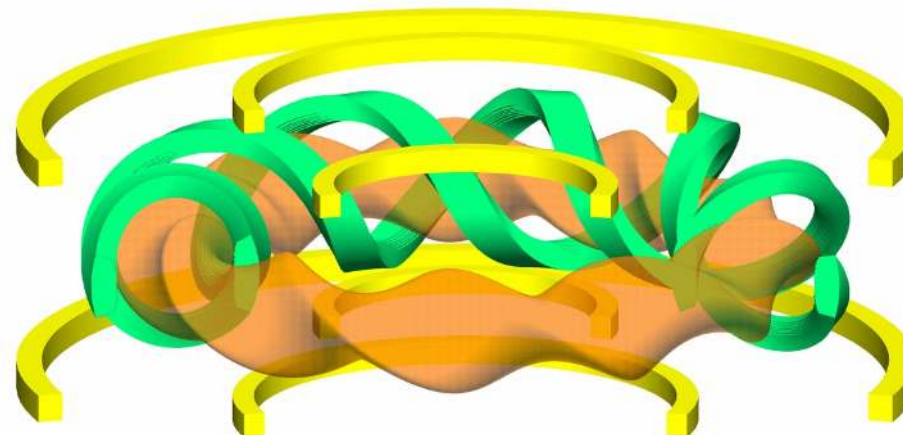
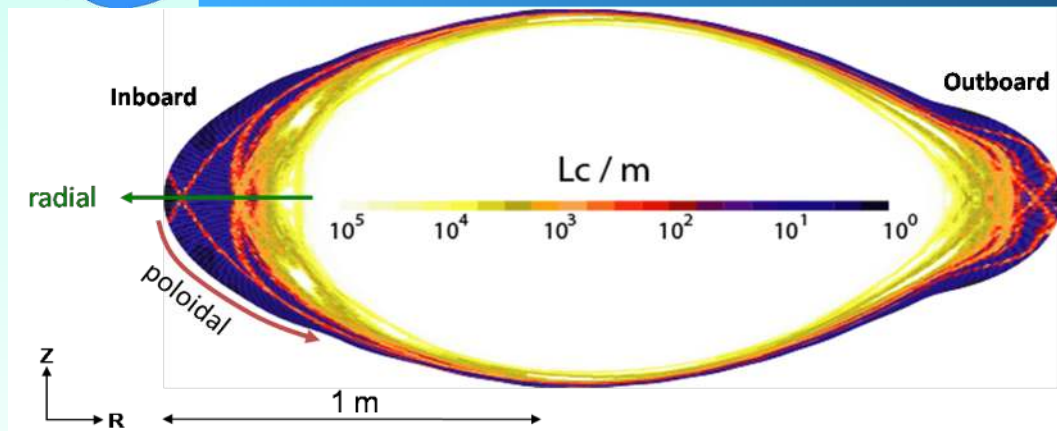
**10トロイダルセクションの内、2セクションについて
トラス内側ダイバータを閉構造化**

不純物パフによるダイバータ熱負荷軽減実験

ネオンパフ放電の実施

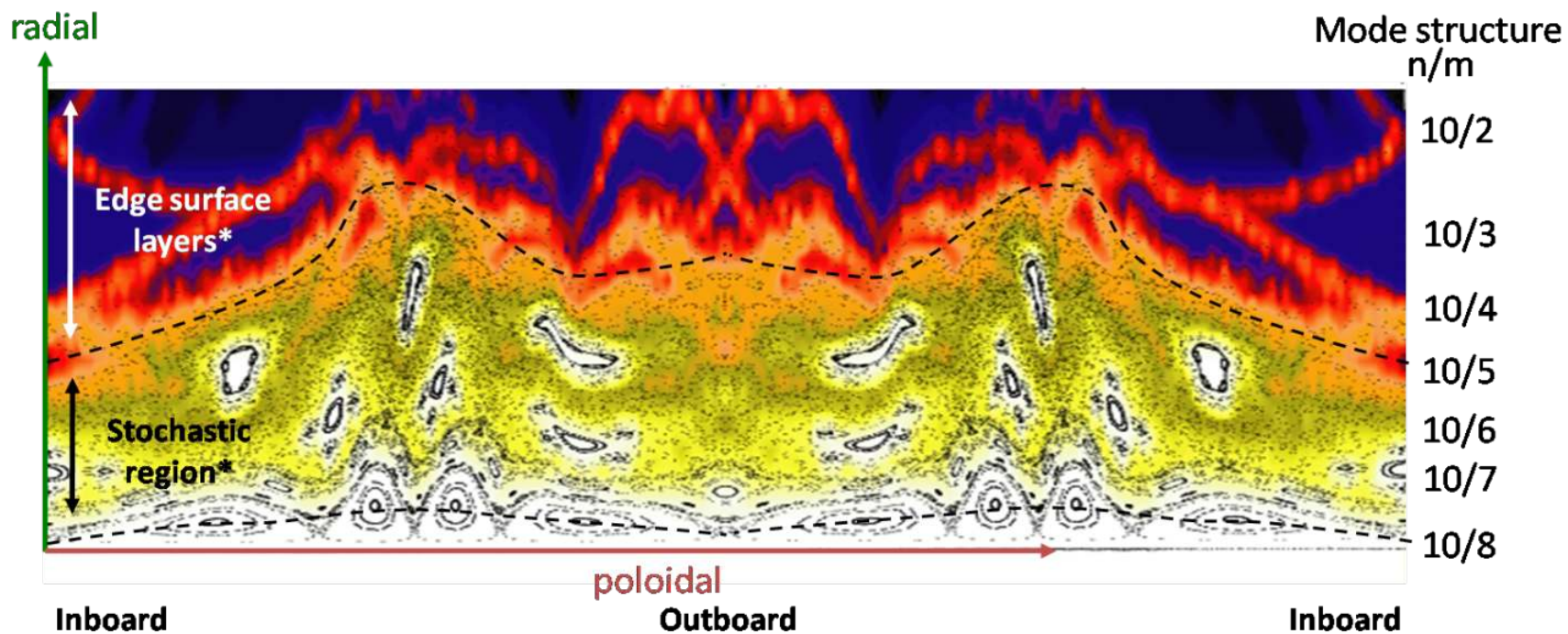


HD配位における周辺磁力線構造



NIFS-PE969

Connection length (L_C) distribution in poloidal cross section





ネオンパフによるダイバータ熱負荷軽減実験

受熱板への熱・粒子負荷の軽減:

→ 放射損失過程の利用

↑ 燃料ガス(水素)だけの放射では不十分。

不純物による更なる放射損失が必要

【課題】 主プラズマへの混入による閉じ込め劣化を防げるか
不純物ガス種・磁場配位の最適化

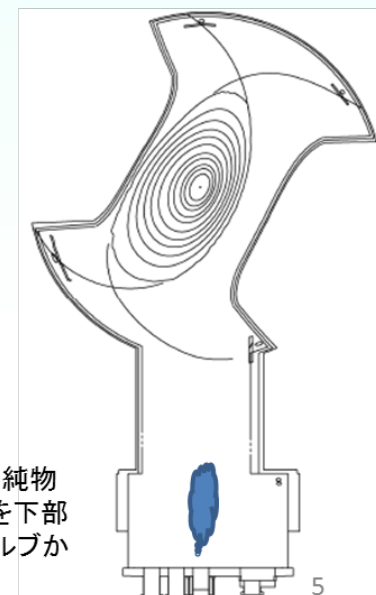
LHDにおける不純物パフによる 放射損失増大実験

- 複雑な周辺磁力線構造をもつヘリカル炉への適用を念頭
- その効果の評価のため、LHDにおいて有効性を検証
- 放射損失増大とプラズマ応答の物理機構の理解



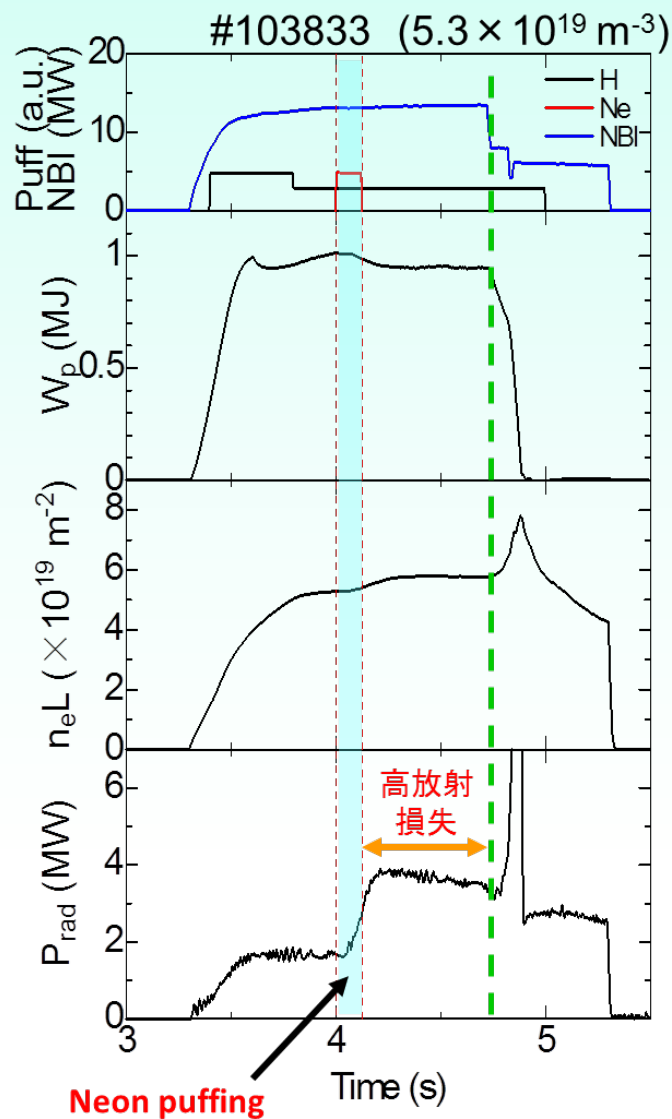
LHDにおける運転領域の探査(電子密度、磁場配位)

水素放電中に、不純物
(主としてネオン)を下部
ポートのピエゾバルブから導入

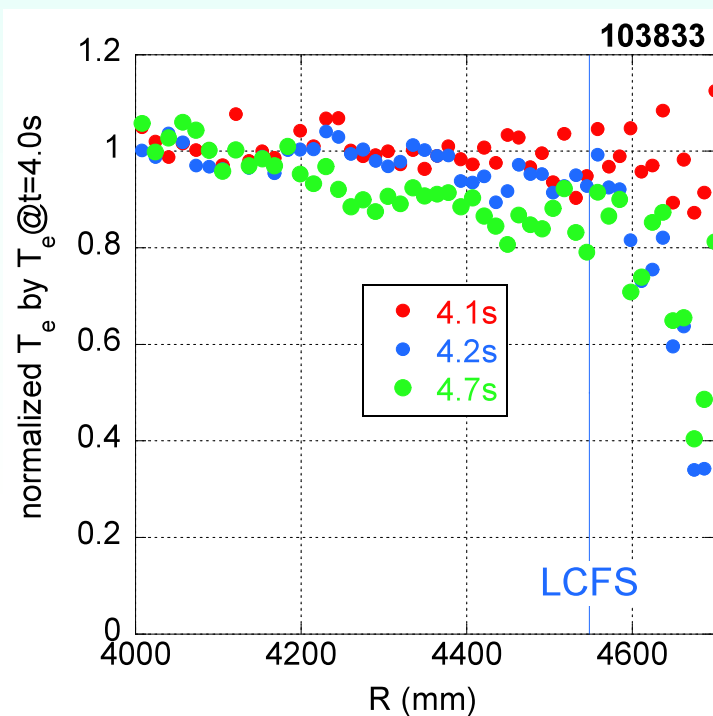




典型的な放電波形



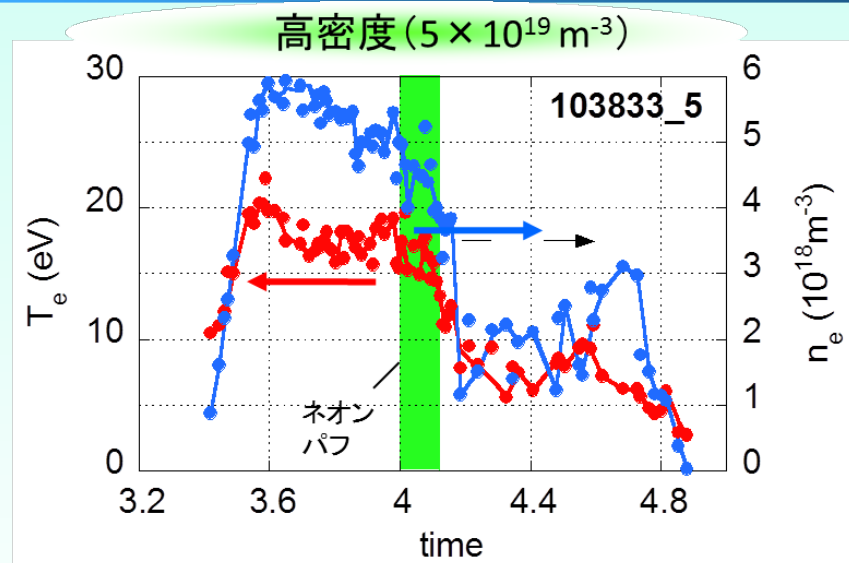
- ネオンパフにより放射損失は約2倍に増大。
- 電子密度は微増。蓄積エネルギーは微減。
- 温度が低下するのは主に最外殻磁気面外側。LCFS付近では300 eV程度で大きい変化は無い。



ネオンパフ前の値で規格化した温度分布



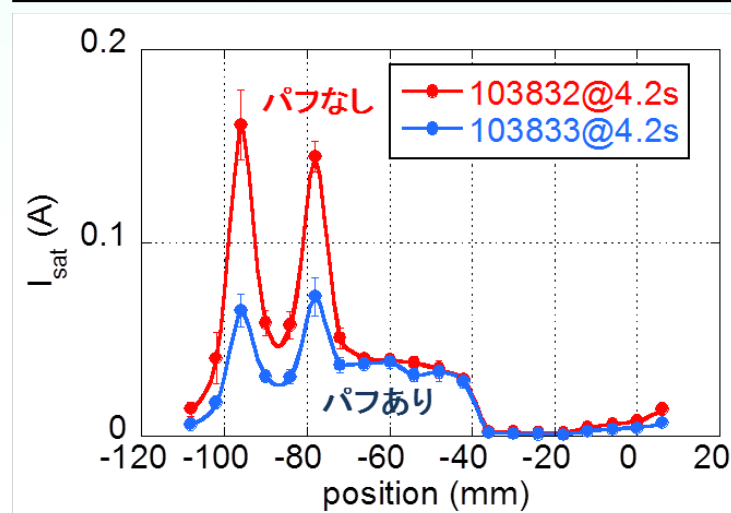
ネオンパフによるダイバータプラズマの変化



受熱板上静電プローブ

- ダイバータの密度と温度は共に低下している。
- 本計測位置への受熱板熱負荷は低下している。

受熱板上静電プローブのイオン飽和電流の分布



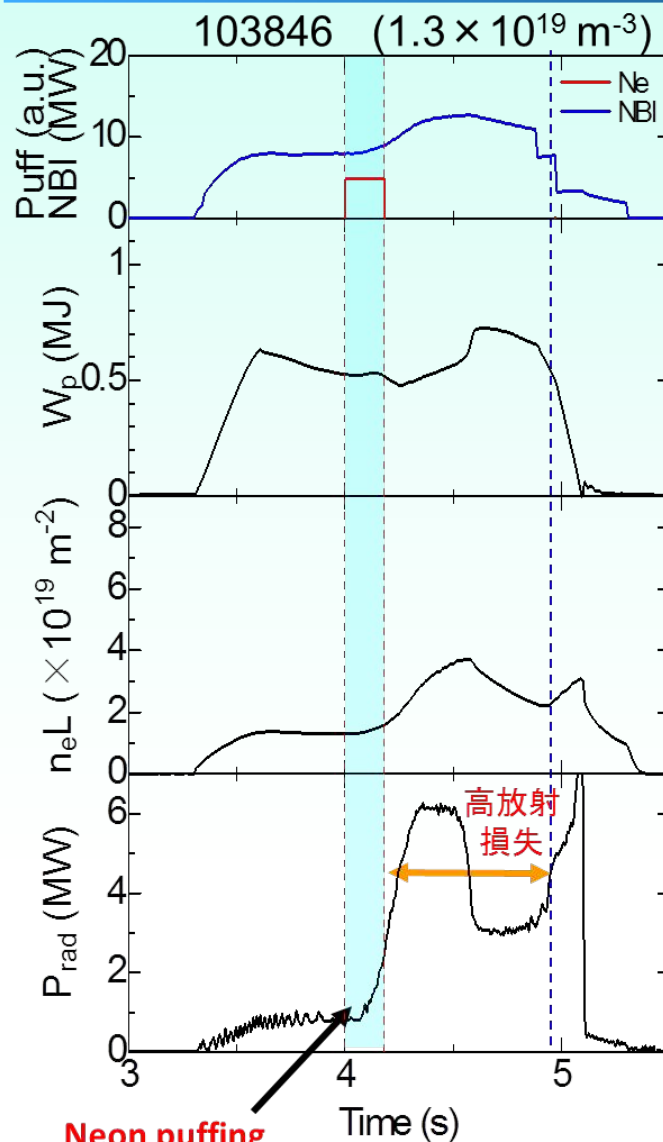
ネオンパフによる粒子束の減少は、受熱板上粒子束分布のピーク位置(長い磁力線が接続)



- 受熱板上の熱・粒子負荷分布を平坦化している。
- 部分非接触ダイバータが実現

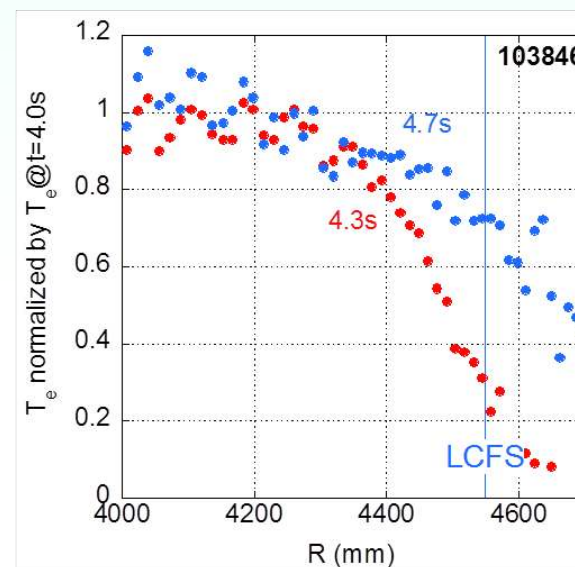


低密度放電へのネオンパフ



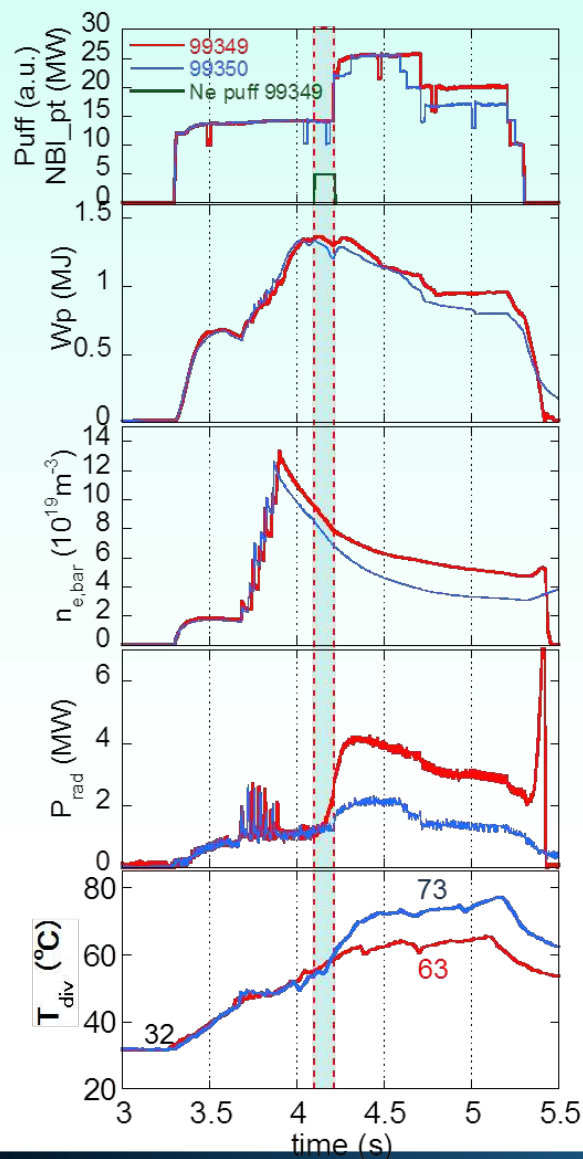
パフ前の密度が低い場合 ($1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)

- ネオンパフにより、放射損失が増大
- ネオンパフで密度増大。蓄積エネルギー W_p の減少は10%程度で済む。
- 温度低下は最外殻磁気面内にも及ぶが (LCFS: 600 $\rightarrow$ 200 eV)、必ずしも放射崩壊には至らない。
- 放電中に温度が回復することあり。密度増加によってNBI加熱吸収がよくなったためか。





高中心圧力放電(SDC/IDB)への適用



Super Dense Core (SDC) / Internal Diffusion Barrier (IDB) 放電:

高加熱入力の場合、受熱板の温度上昇



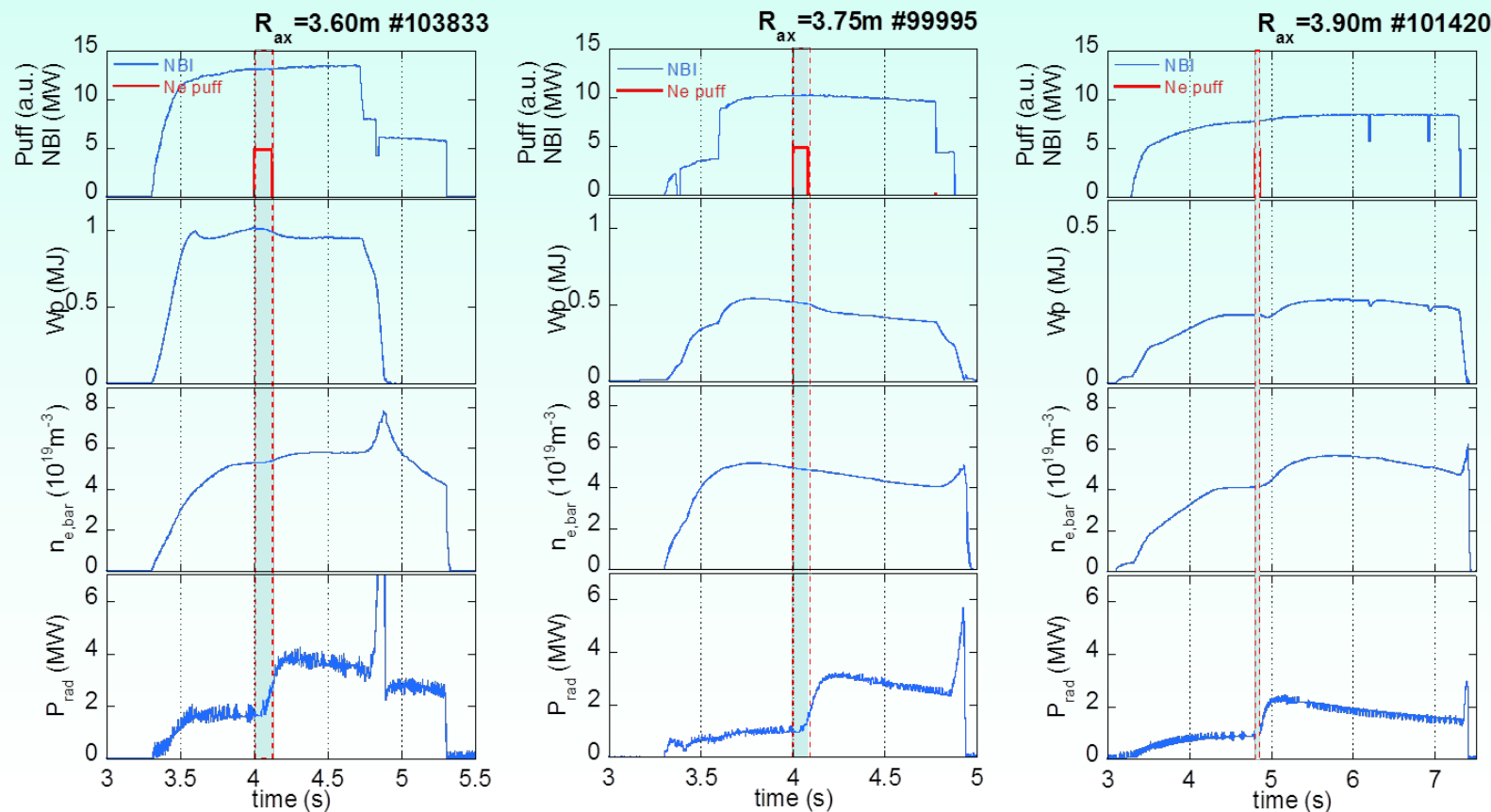
ネオンパフによる熱負荷の軽減

- W_p を下げずに、放射損失を2倍に増加させることに成功。
- 受熱板の温度上昇を2割減少させることが出来る。
- 受熱板への熱負荷低減を確認。

不純物パフによる放射損失増大は、
LHDの特長の一つである高密度放電に
整合し、実用的な手法であることを実証



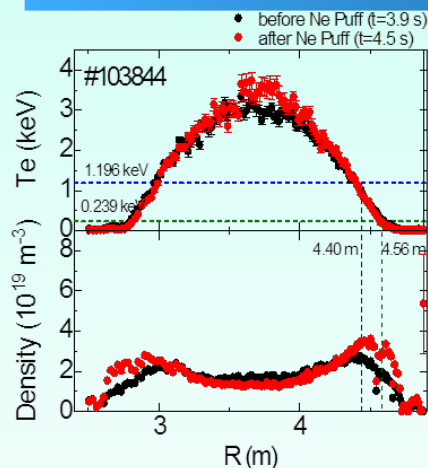
ネオンパフの効果は磁場配位によらない



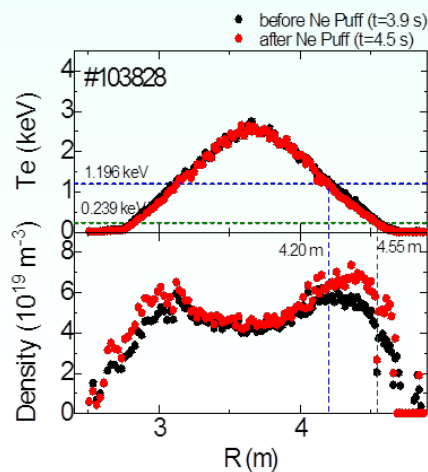
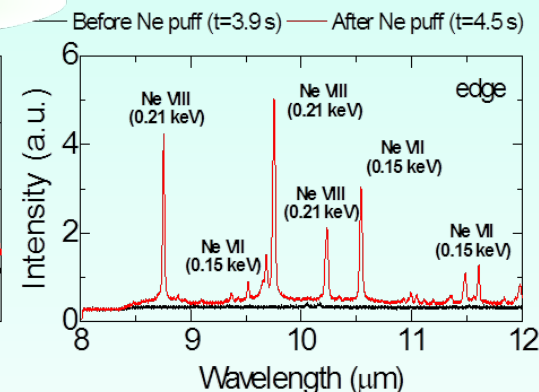
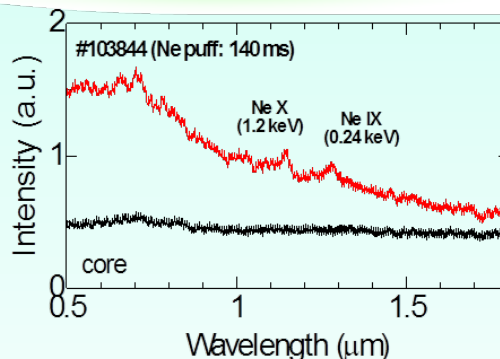
- 蓄積エネルギーを大幅に減らすことなく、磁気軸位置 $R_{ax}=3.60, 3.75, 3.90\text{ m}$ のいずれの配位においても、ネオンパフによる放射損失を増大させることに成功した。
- ネオンパフ量に対する耐性については、磁場配位で異なる。 $R_{ax}=3.90\text{ m}$ の場合は他の配位と比較してネオンパフ量の耐性が低く、放射崩壊しやすい。周辺磁場構造・温度・密度分布等の違いによるネオンの輸送の違いか？



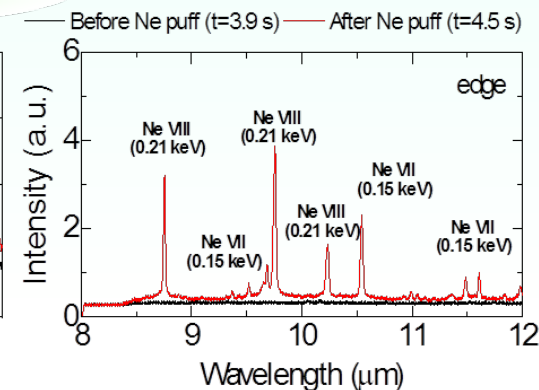
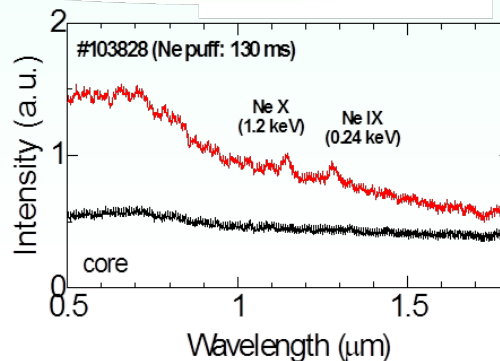
分光によるネオンの観測



低密度 ($2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)



高密度 ($5.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)



負電場となって不純物の蓄積が懸念される高密度の場合でも、不純物パフ量がほとんど同じなら、コア領域でのNeの発光強度 ($I \propto n_i n_e \sigma_v$) は低密度の場合とあまり変わらず、不純物が蓄積している様子はない。高密度における不純物のスクリーニング効果が寄与している可能性が考えられる。

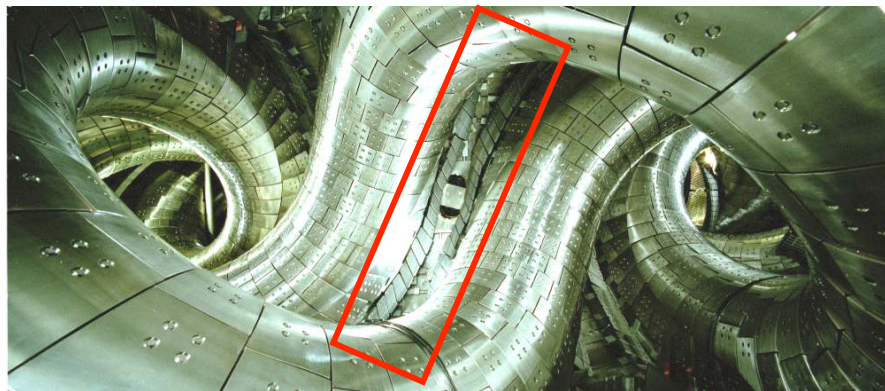
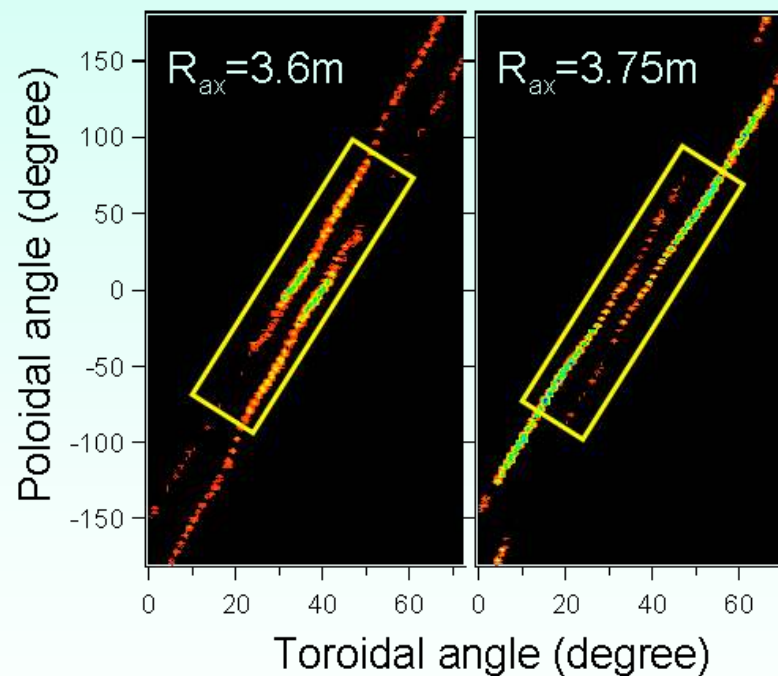
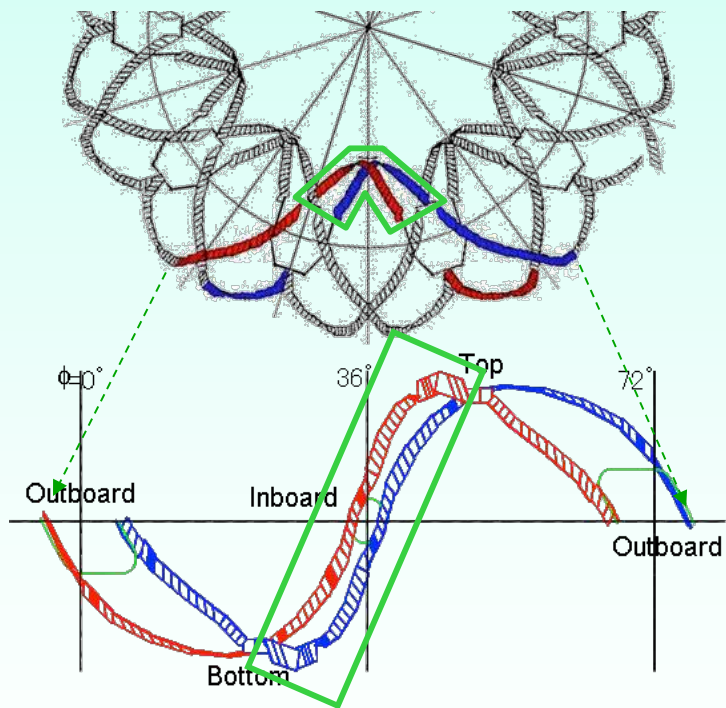


ネオンパフ実験のまとめ

- ダイバータへの熱負荷軽減手法として、水素放電中へのネオンパフを試みた。
- 放射損失の増大、ダイバータ熱負荷の軽減を観測
- ベースとなるプラズマの密度により、ネオンパフの影響が及ぶ空間領域が異なる。
 - ✓ 低密度 主プラズマ周辺まで影響が及ぶ
 - ✓ 高密度 最外殻磁気面より外
- 今後の課題
 - ✓ ネオンパフ時の周辺モデリング
 - ✓ より高い放射損失割合実現の探求
 - 窒素など他の不純物パフ実験の実施



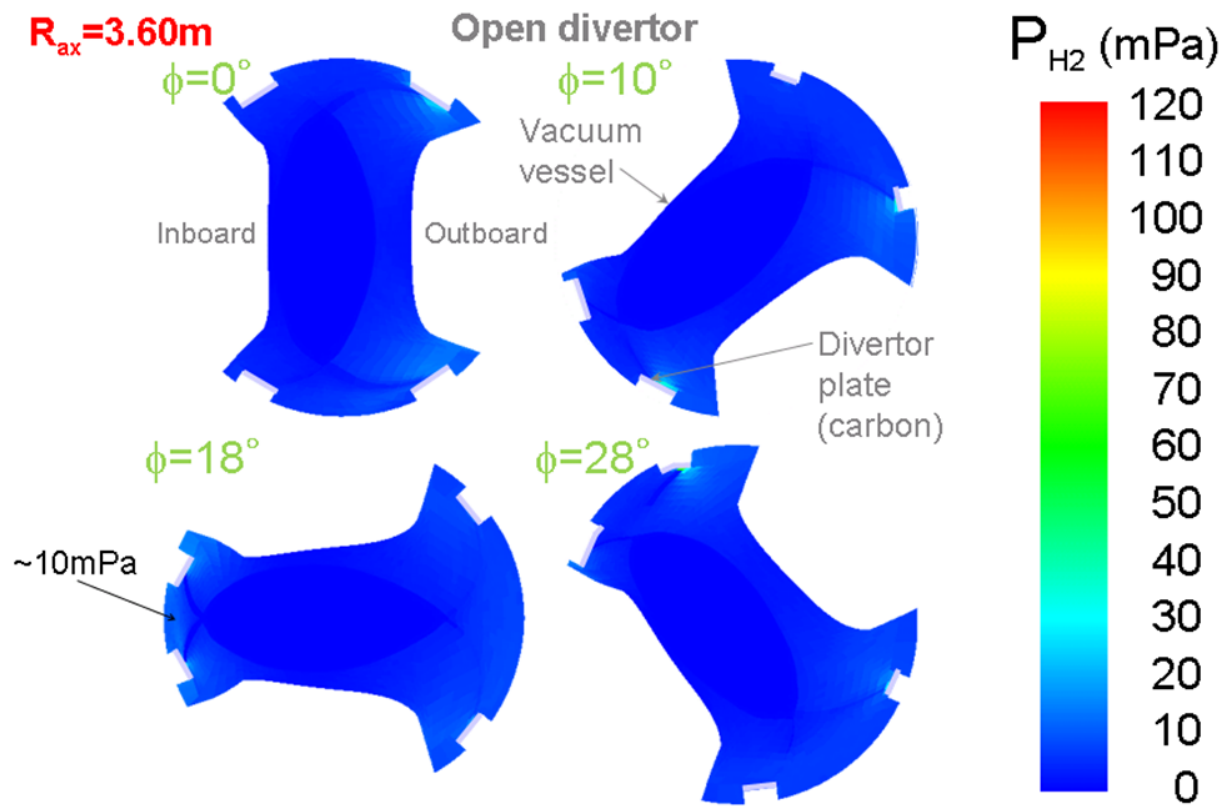
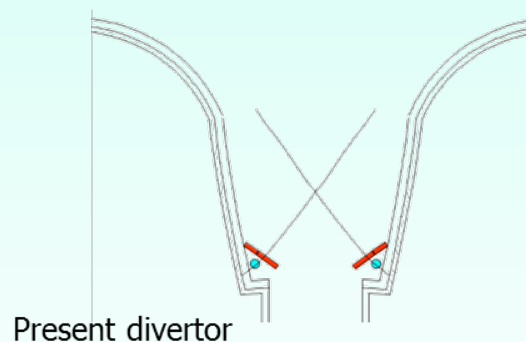
試験的なバップル構造ダイバータの設置



- 主な実験磁場配位で、粒子負荷の大きいトーラス内側ダイバータを改造した。

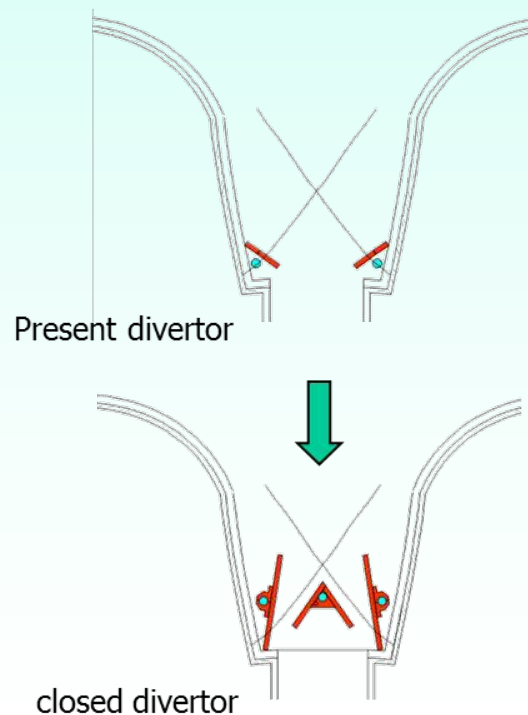


EIRENEコードによる中性粒子圧力予測

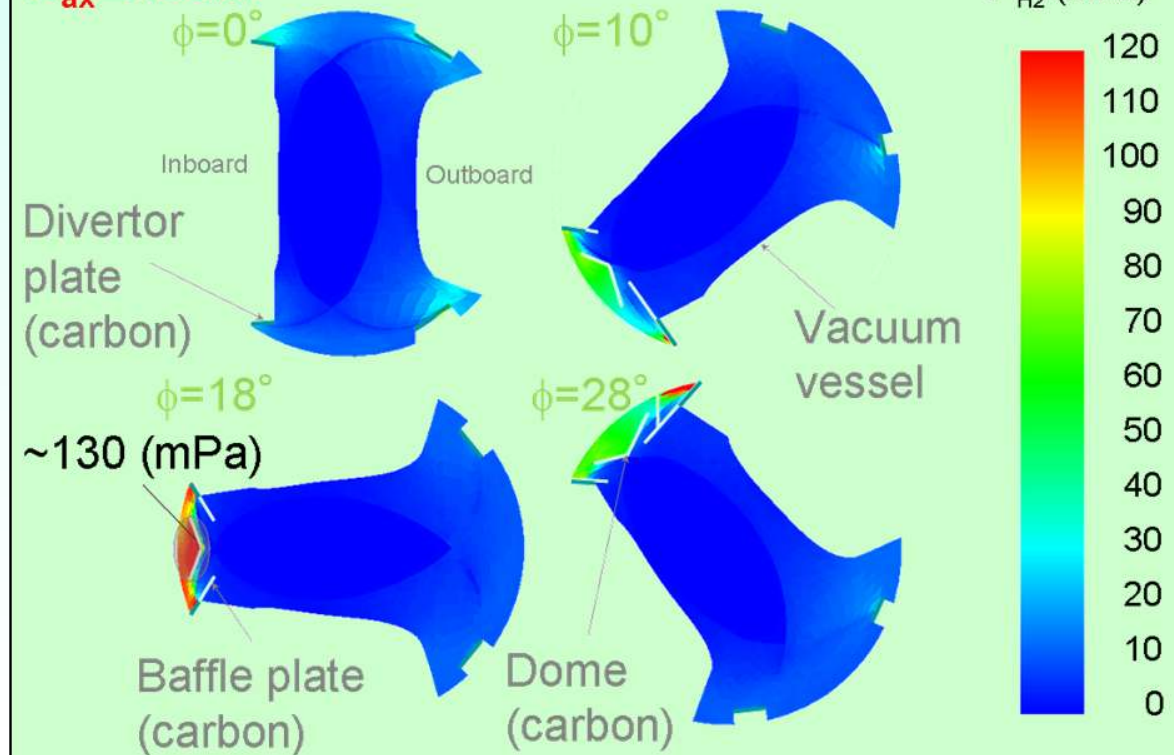




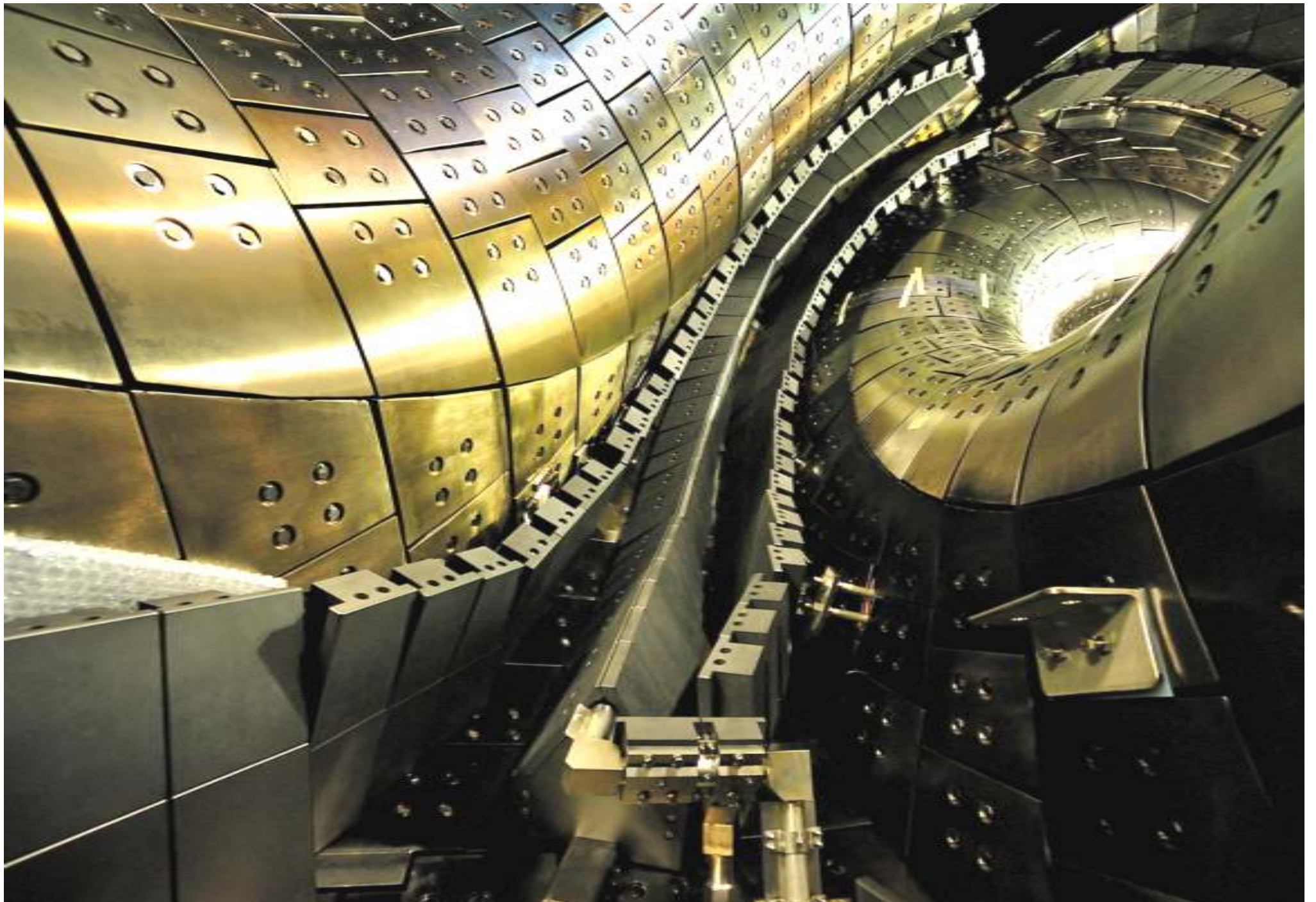
EIRENEコードによる中性粒子圧力予測



$R_{ax} = 3.60m$

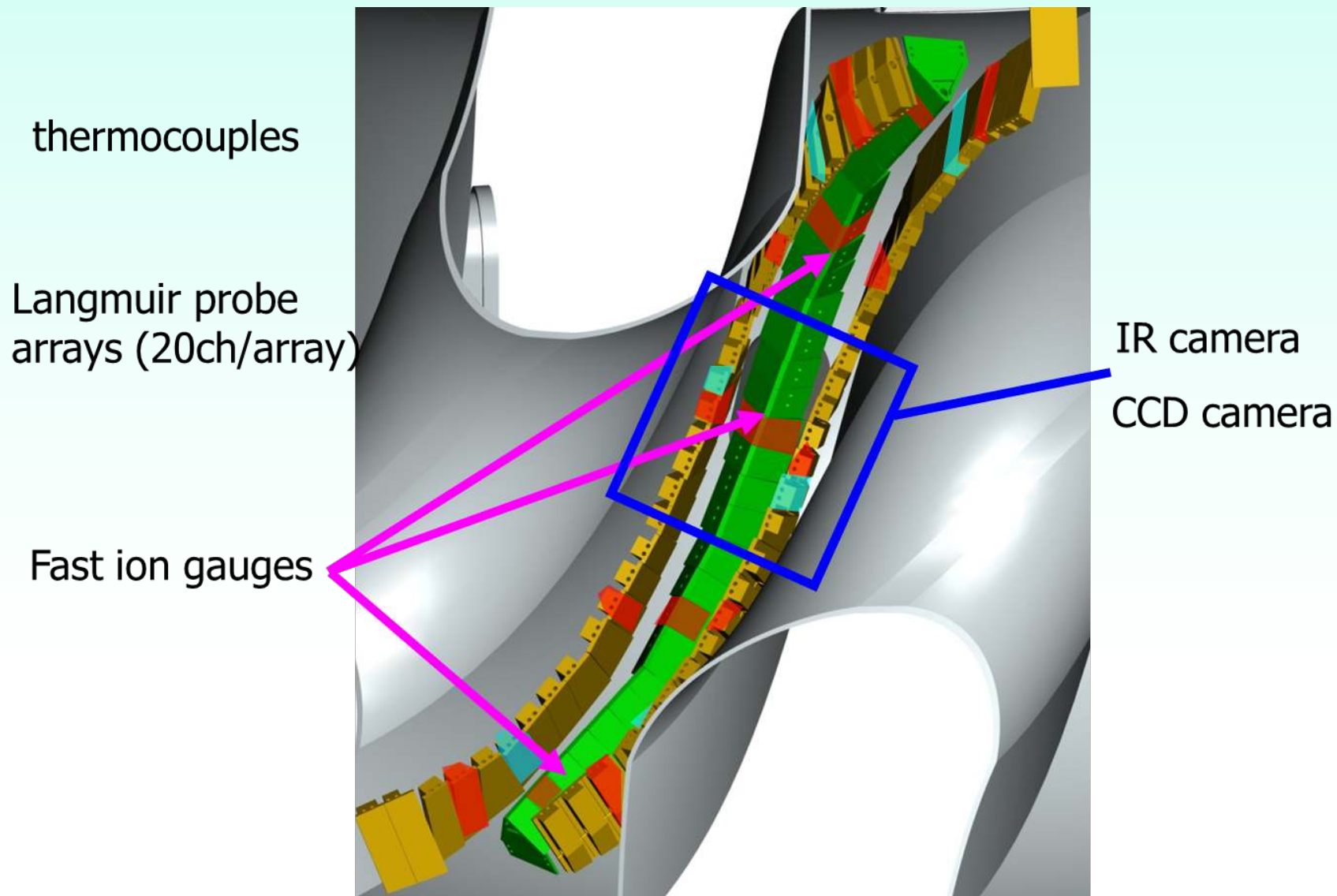


Neutral pressure distribution in the poloidal cross-sections.



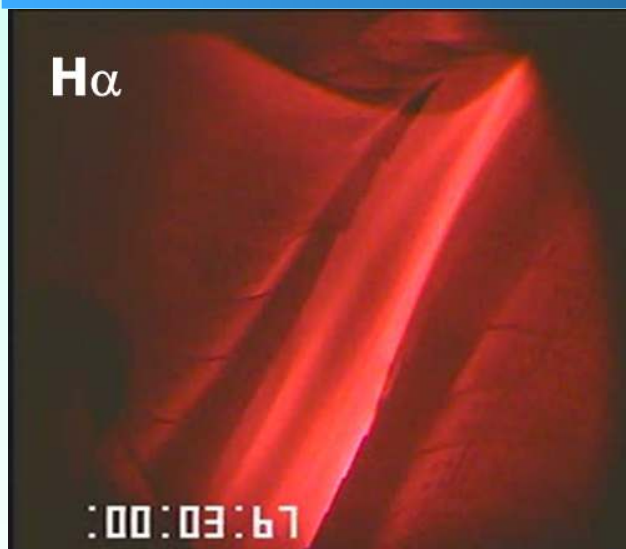


バッフル構造ダイバータ部の計測機器配置

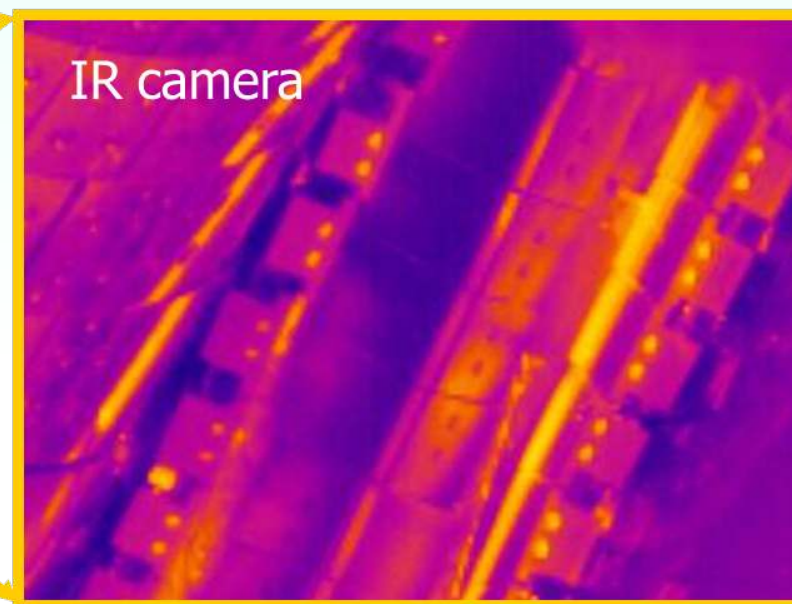
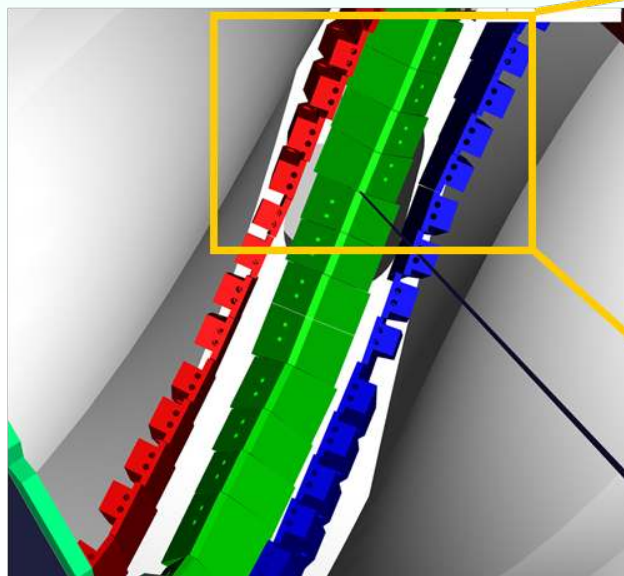




バッフル構造ダイバータのカメラ観測

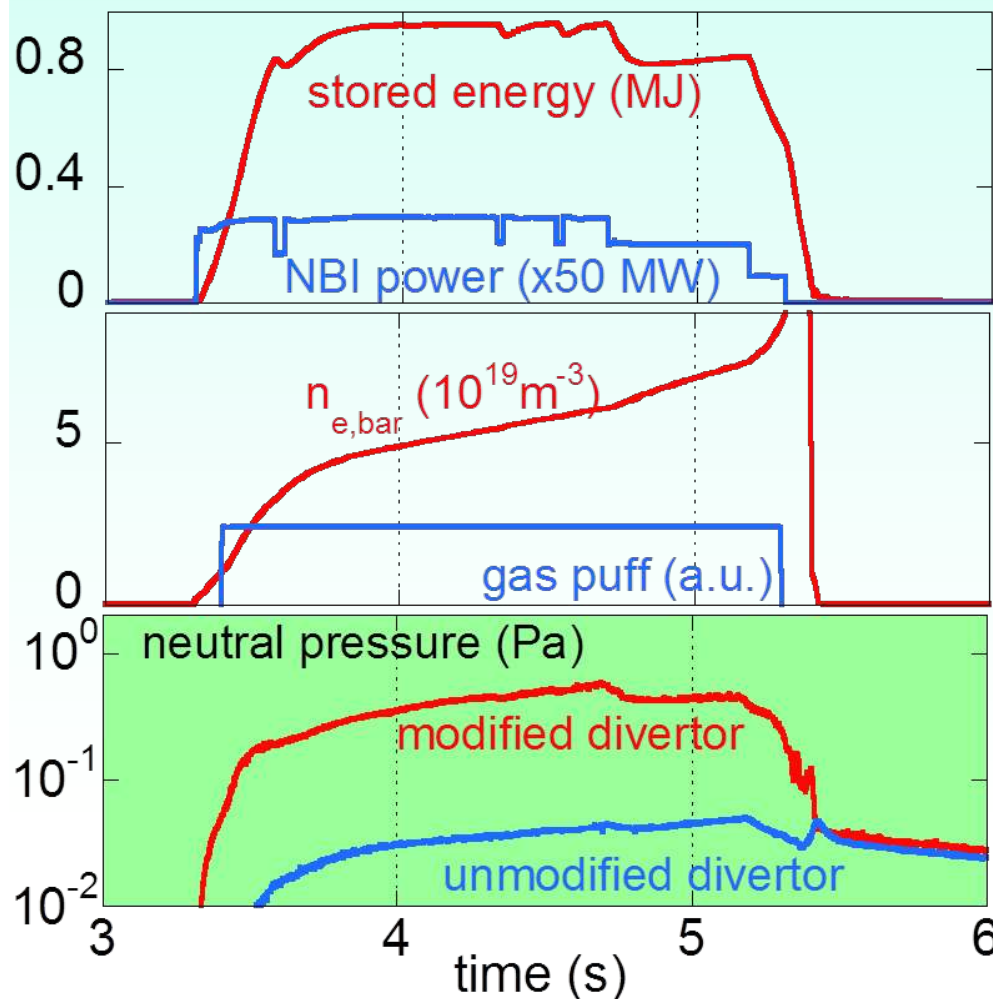


- ドーム構造には大きな熱負荷はない。
- バッフル構造の、運転への悪影響は見られない。





バッフル構造ダイバータ部の中性粒子圧力



- 密度ランプアップ放電において、ダイバータ部中性粒子圧力計測を行った。
- バッフル構造を設置したダイバータ部では、従来のダイバータ部に比べて10倍程度高い圧力を観測した。

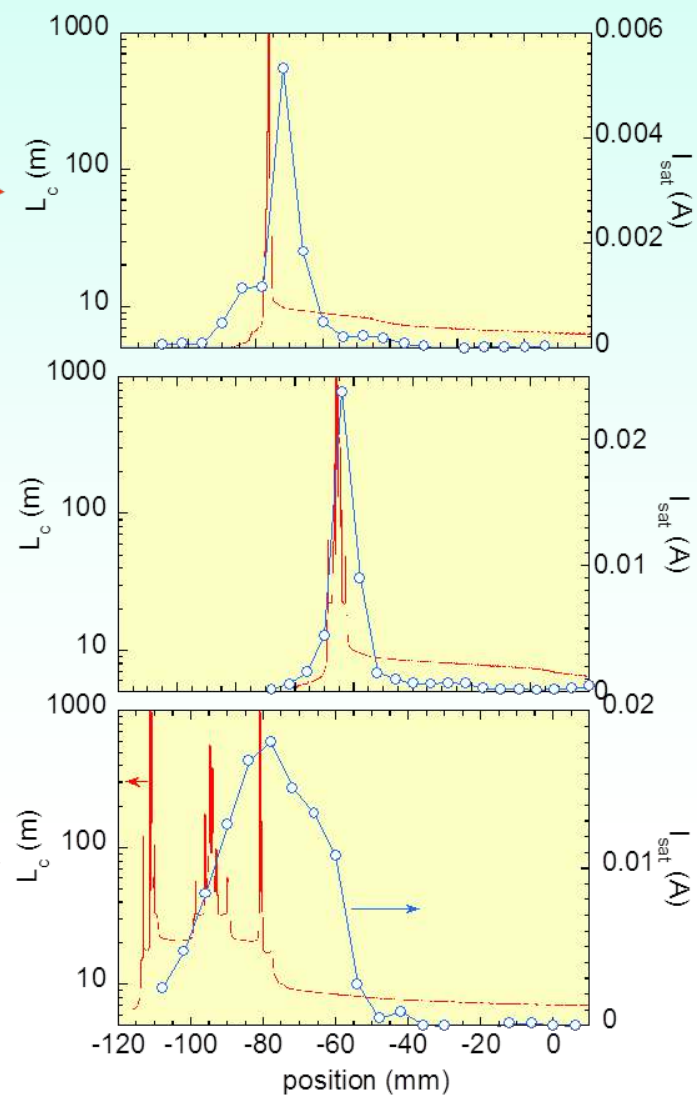
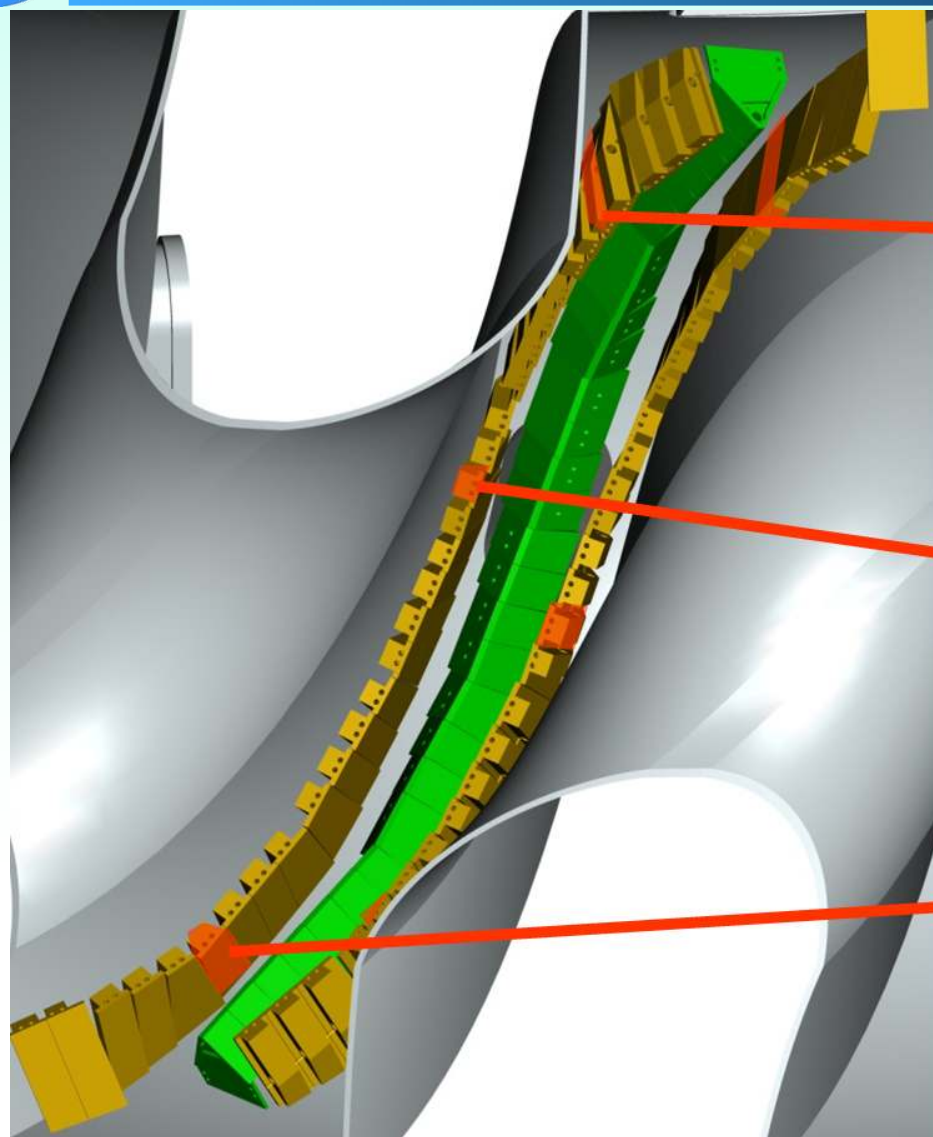
トカマク装置におけるダイバータ部中性粒子圧力

Machine	Pressure (Pa)	n_e ($10^{19} m^{-3}$)	Discharge mode	Reference	Comment
Alcator	3-6	20-40	ohmic	[97]	Bypass open
C-Mod	6-12	20-40		[89]	Bypass closed
DIID-D	0.5-7	5-9	ELMy H	[86, 93]	
ASDEX-U	0.2-0.7	7-9	ELMy H	[65]	n_e gas puff scan
JET	0.02-0.25	5-7	ELMy H	[124]	n_e gas puff scan

Nucl.Fusion, 39 (1999) 2413.



ダイバータプラズマの3次元構造の観測



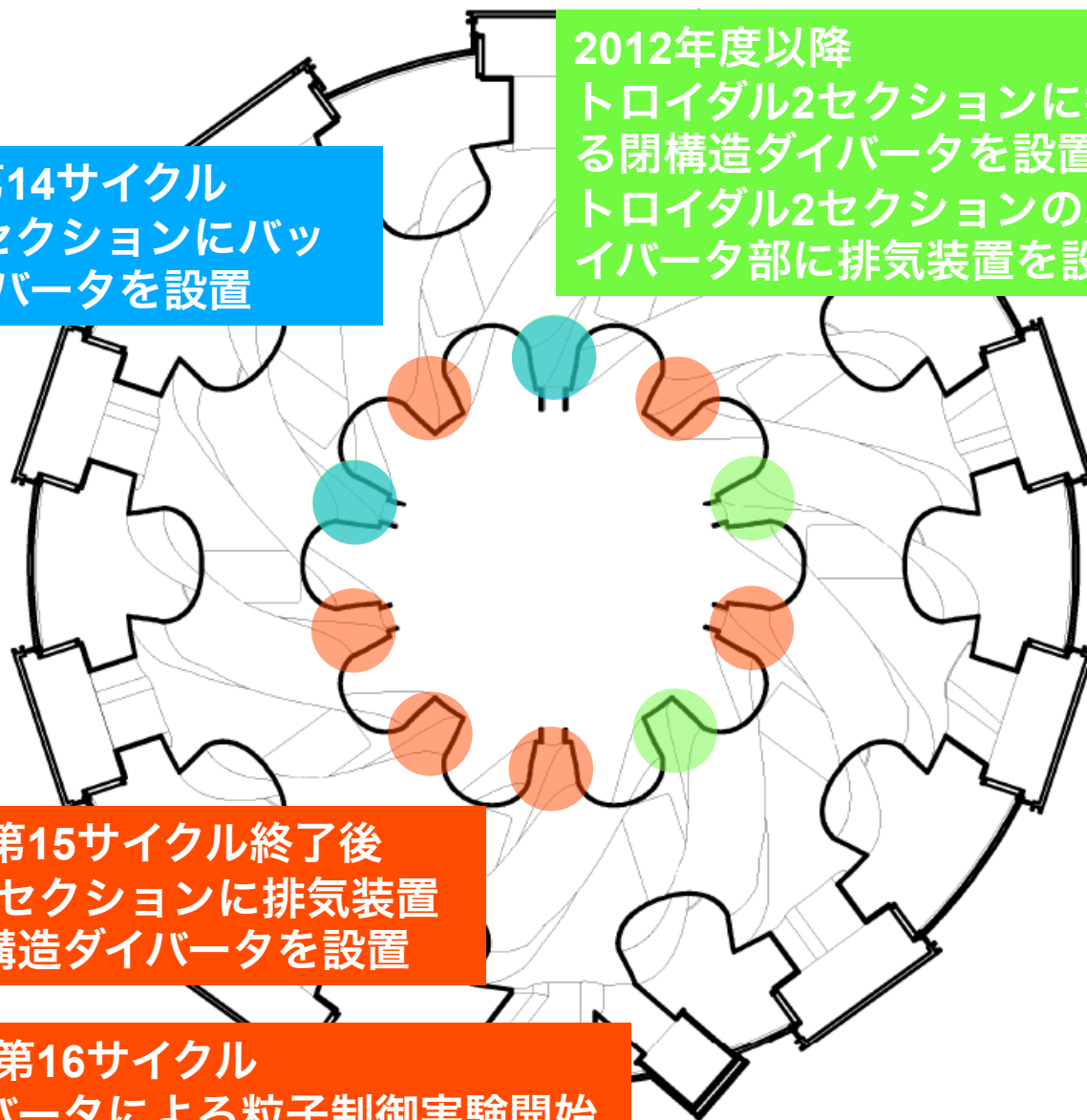
閉構造ダイバータへの改造計画

2010年度 第14サイクル
トロイダル2セクションにバッフル構造ダイバータを設置

2012年度以降
トロイダル2セクションに排気装置を備える閉構造ダイバータを設置
トロイダル2セクションのバッフル構造ダイバータ部に排気装置を設置

2011年度 第15サイクル終了後
トロイダル6セクションに排気装置を備える閉構造ダイバータを設置

2012年度 第16サイクル
閉構造ダイバータによる粒子制御実験開始



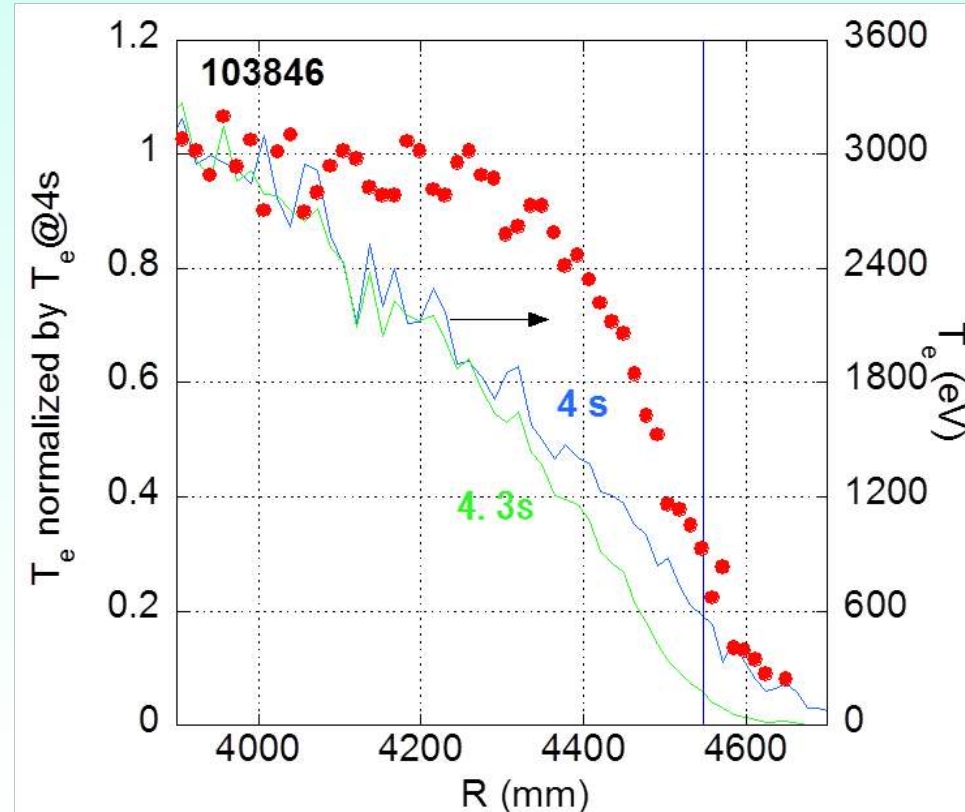
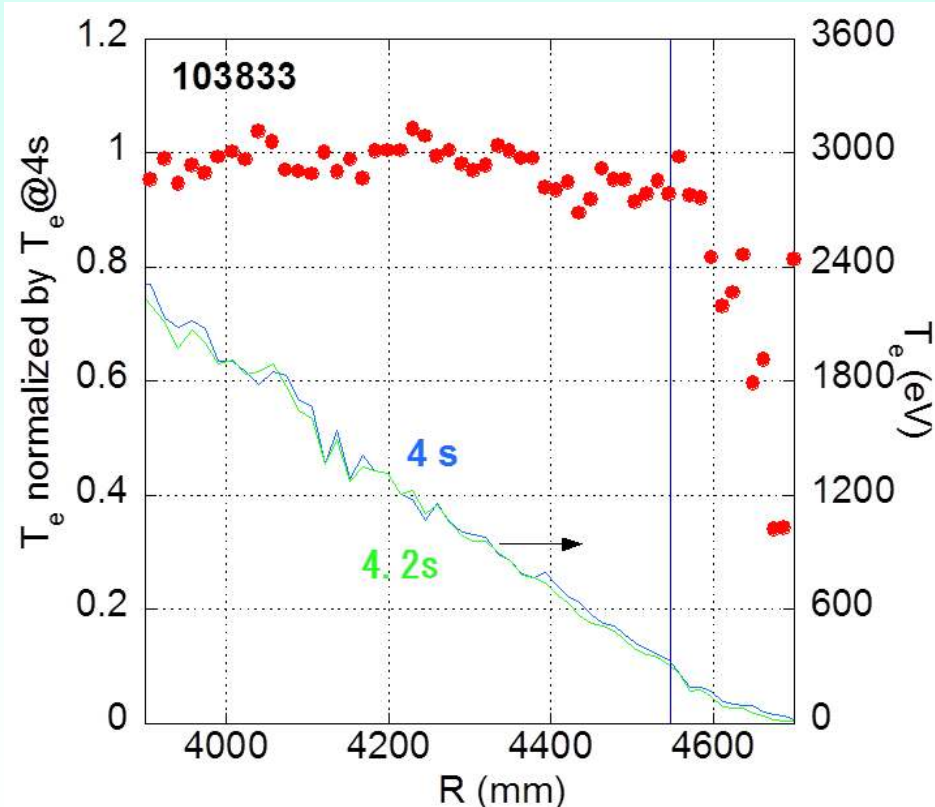


-
- ダイバータ板
- ダイバータタ板
- オンポンプ
- ドーム
- ドーム構造
- 水冷管
- 支持金具
- 温度絶縁用スペーサ
- クライオパネル
- クライオパネル支持金具
- 保護板
- 水冷却ルーバースライフ
- N₂冷却シェブロン
- クライオパネル
- 液体窒素冷却シェブロン





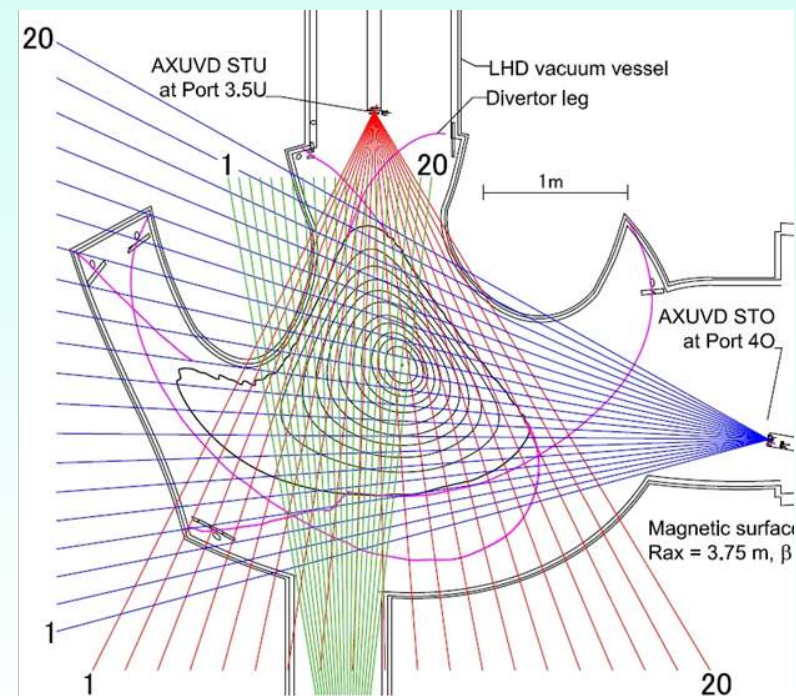
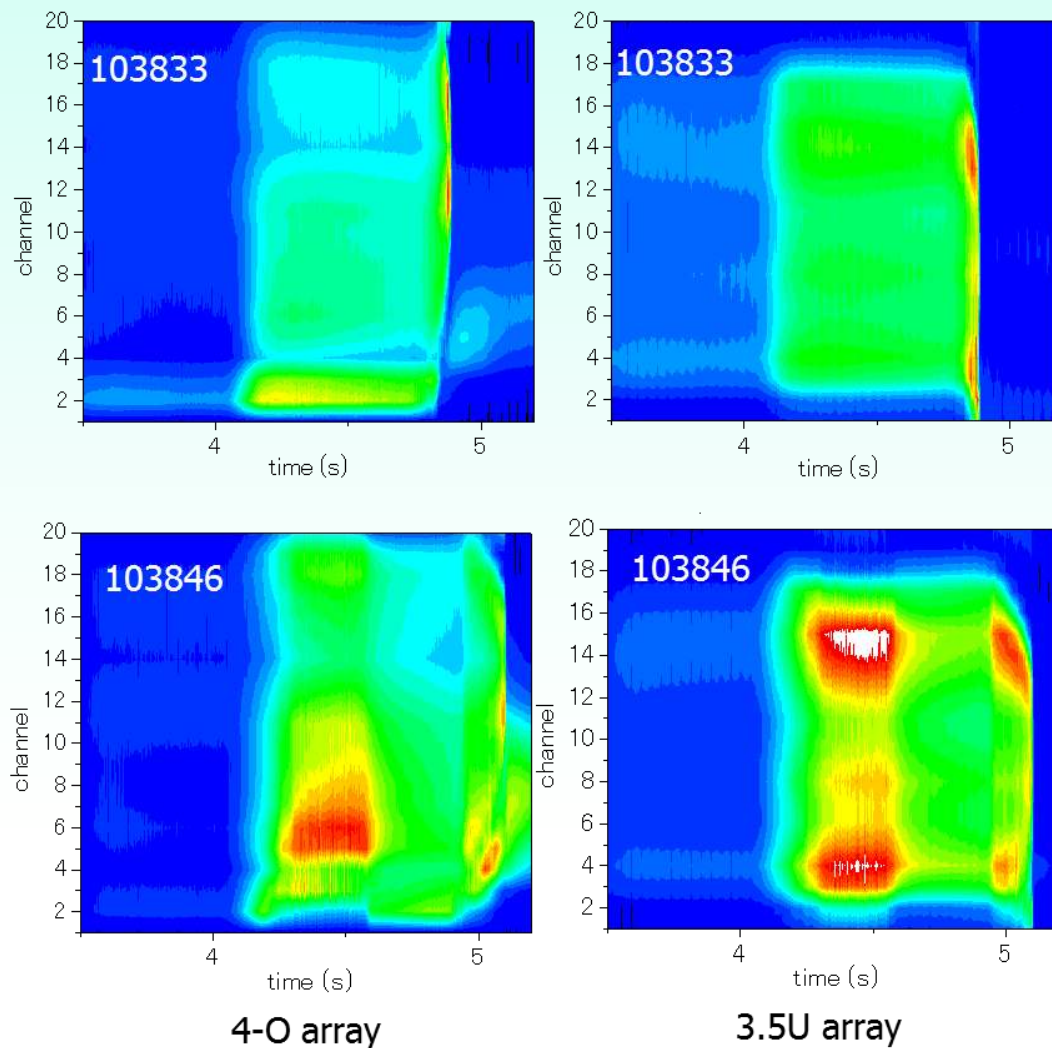
ネオンパフ時の電子温度変化



- ネオンパフ前の密度が高い103833では、LCFSの電子温度は300eV程度で大きくは低下せず。
- ネオンパフ前の密度が低い103846では、LCFSの電子温度は600eV程度から200eV程度まで低下。



ネオンパフ時の放射損失分布



- 4-O arrayのデータから、ネオンパフ前の密度が低い103846では、密度が高い103833に比べて内側に高い放射領域があることがわかる。
- ✓ 電子温度分布変化と整合がとれている。



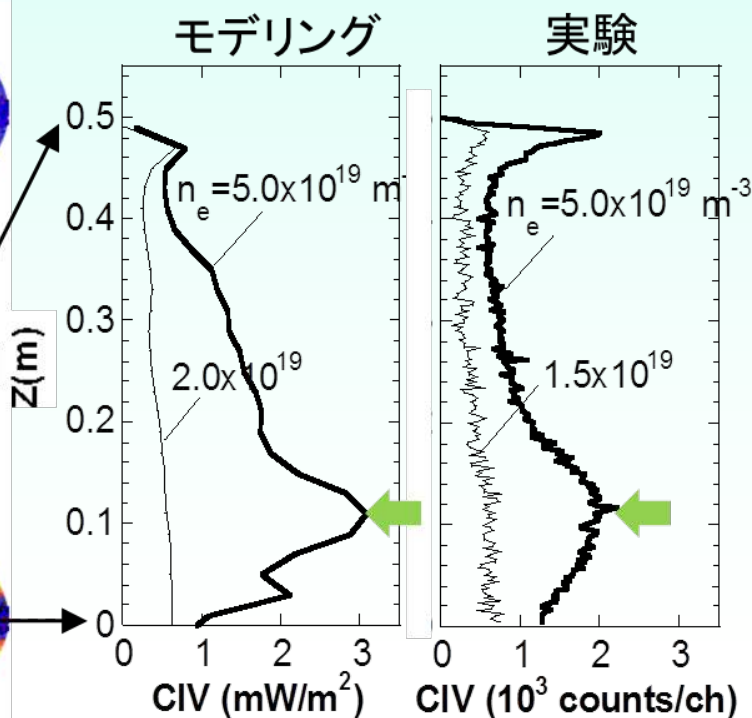
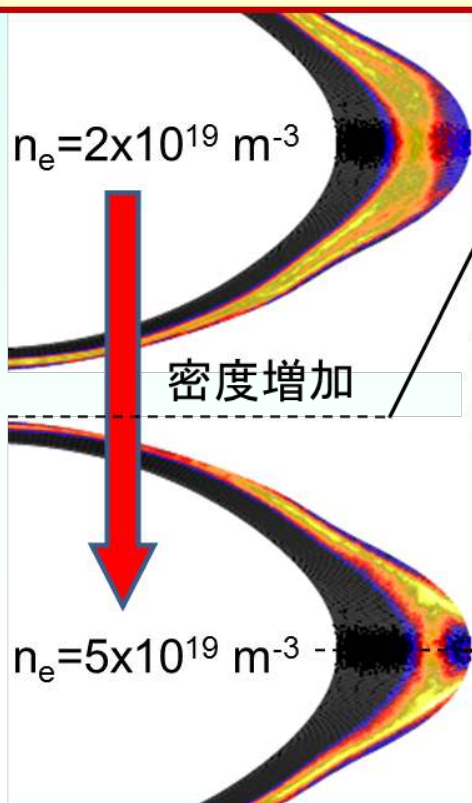
不純物遮蔽

C³⁺の密度分布(3次元モデリング)

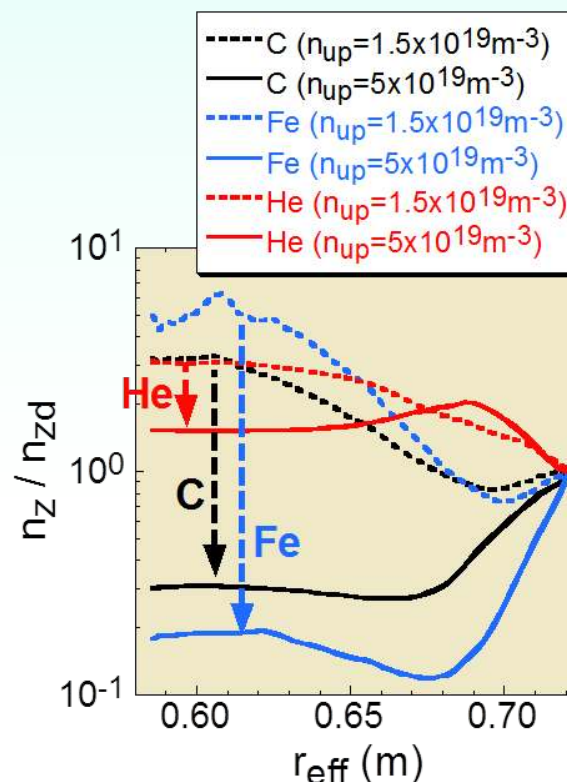
分光計測の垂直方向分布のモデルとの比較

両者にモード構造による明確なピーク(←)

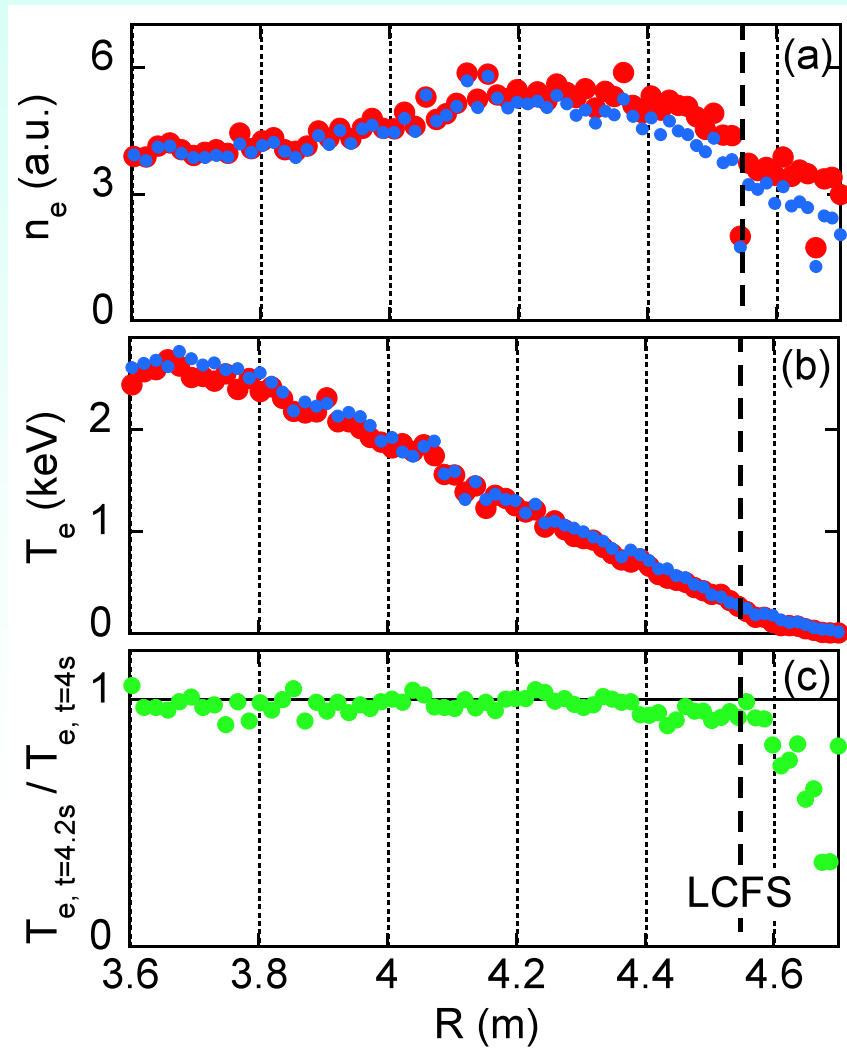
ポロイダル方向にほぼ一様に分布



モデルによれば原子番号の大きい不純物ほど遮蔽効果は大きい



遮蔽効果により、より周辺部に局在
→ 磁力線のモード構造を反映





LHDにおけるダイバータ研究

- 統計的磁気面・残留磁気島・ラミナー層の混在する磁力線構造中での輸送
 - ✓ プラズマ輸送
 - 拡散的輸送
 - 非拡散的輸送 (blob)
 - ✓ 不純物輸送
- ダイバータ熱負荷軽減
 - ✓ 周辺磁気島生成による安定デタッチメント形成
 - ✓ 不純物パフによる周辺温度の低下
- 粒子制御
 - ✓ 粒子バランス
 - ✓ 能動的な粒子制御
 - Local Island Divertor
 - ヘリカルダイバータの閉構造化
- プラズマ・壁相互作用
 - ✓ タングステンダイバータ板
 - ✓ 堆積層分析
 - ✓ ダスト挙動