



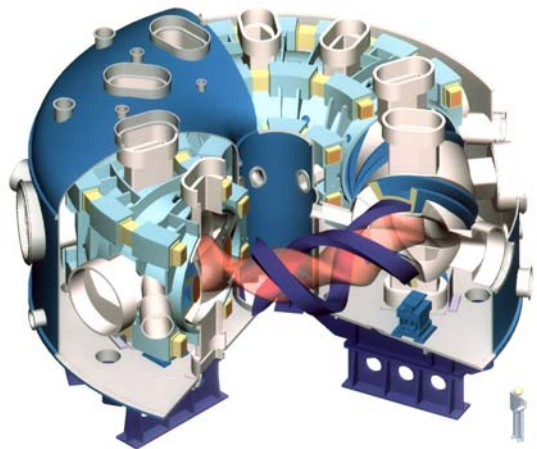
第11回 若手科学者によるプラズマ研究会  
「プラズマ中の現象の視覚化とその展望」  
2008年3月17日-19日 原子力機構(那珂)

# LHD実験の進展

~高Ti放電 & IDB放電を中心に~

---

永岡 賢一 核融合科学研究所

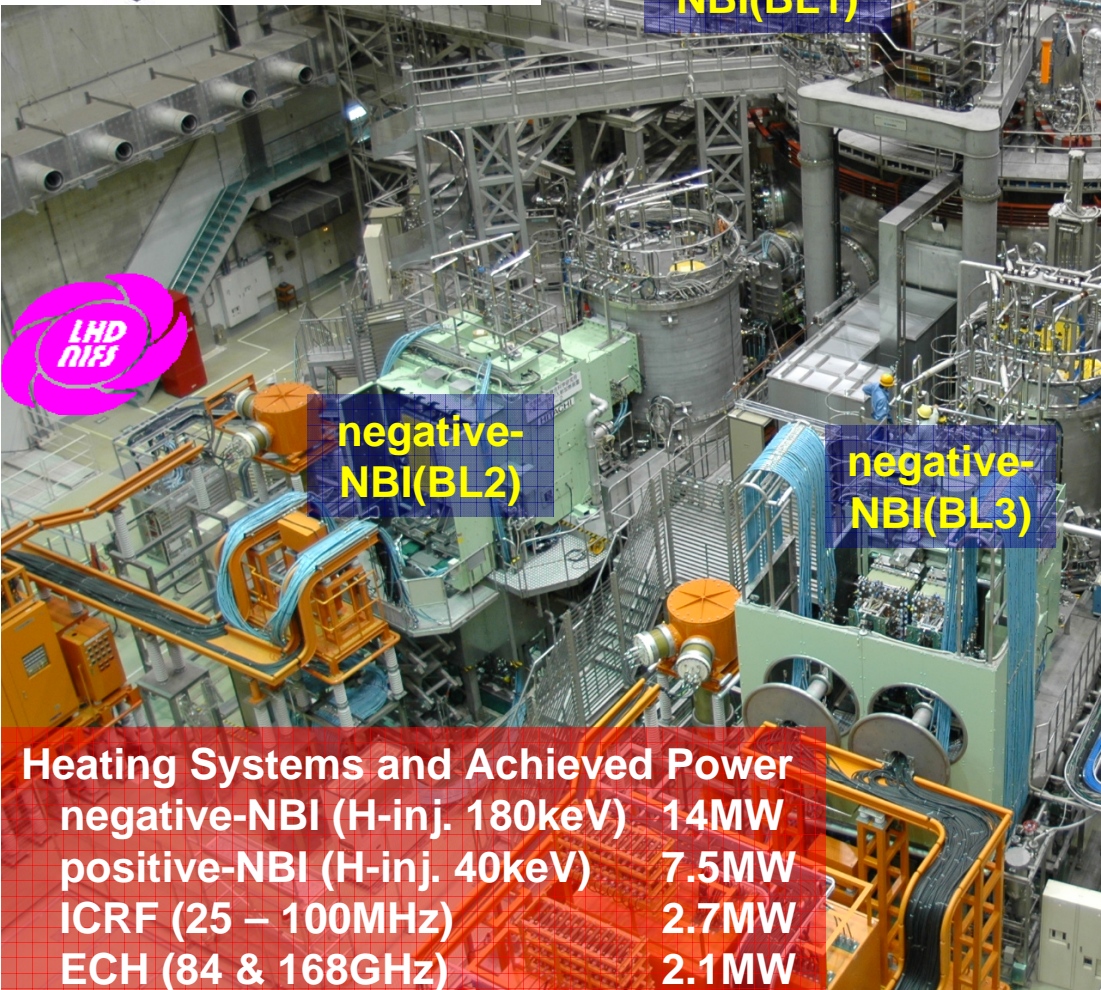


# Large Helical Device (LHD)

Heliotron configuration of  $l=2/m=10$  field period  
 All superconducting coil system  
 Plasma major radius 3.42-4.1 m  
 Plasma minor radius 0.6 m  
 Plasma volume 30 m<sup>3</sup>  
 Toroidal field strength 3 T

negative-NBI(BL1)

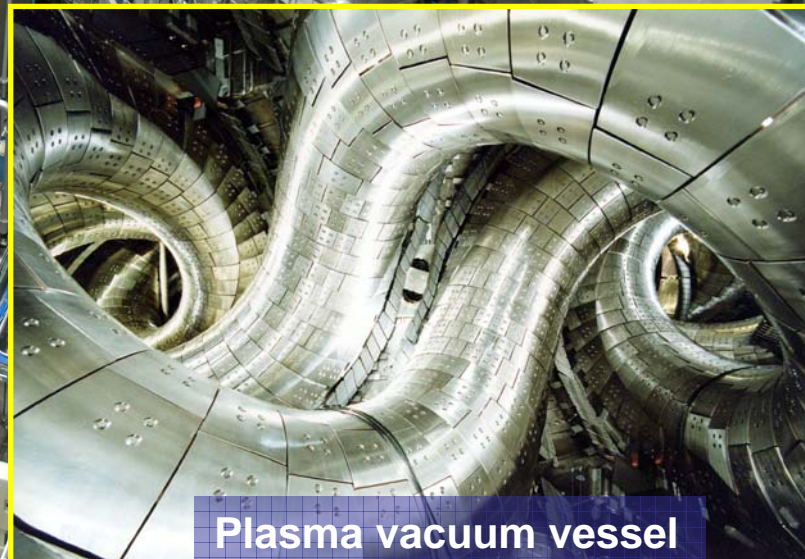
positive-NBI(BL4)



negative-NBI(BL2)

negative-NBI(BL3)

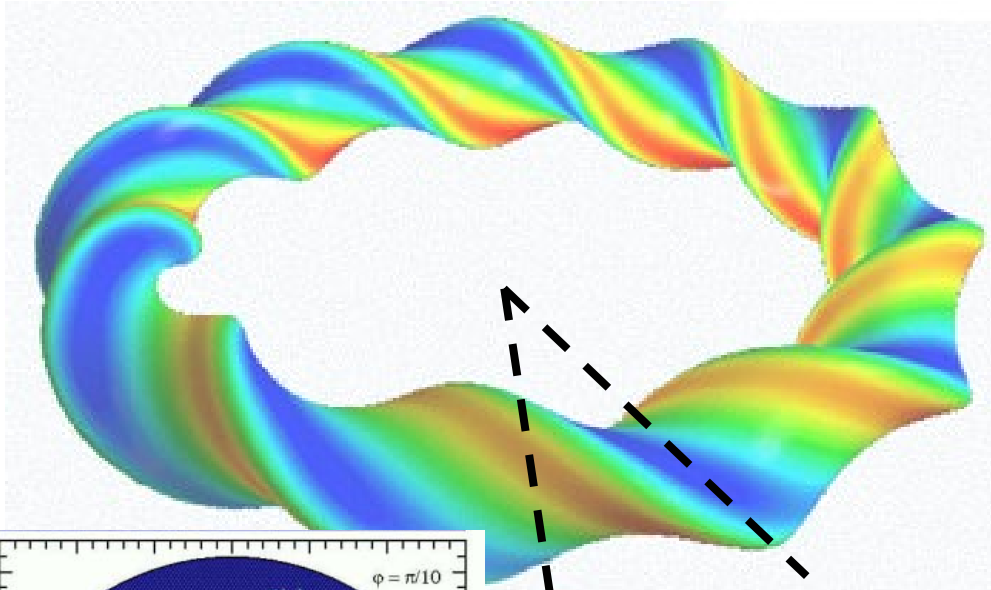
Heating Systems and Achieved Power	
negative-NBI (H-inj. 180keV)	14MW
positive-NBI (H-inj. 40keV)	7.5MW
ICRF (25 – 100MHz)	2.7MW
ECH (84 & 168GHz)	2.1MW



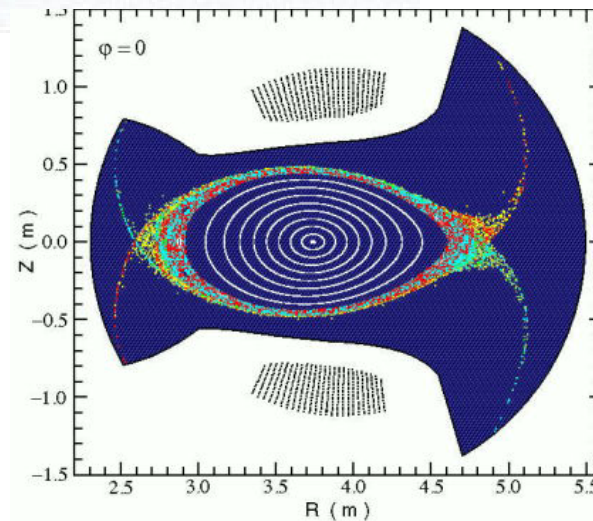
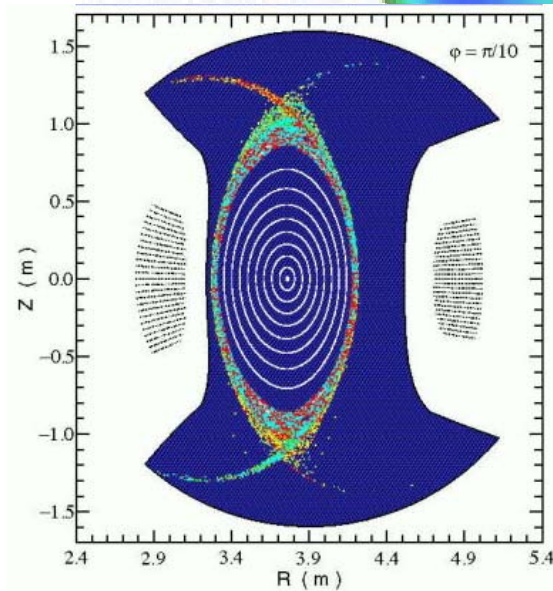
Plasma vacuum vessel



# LHDのプラズマ



- 大半径: 3.9m
  - 平均小半径: 0.6m
  - トロイダルモード数: 10
  - ポロイダルモード数: 2
  - カオス磁力線領域
  - ダイバータトレース
  - 閉じた磁気面構造を持っている
- (電流駆動が必要ない!)**



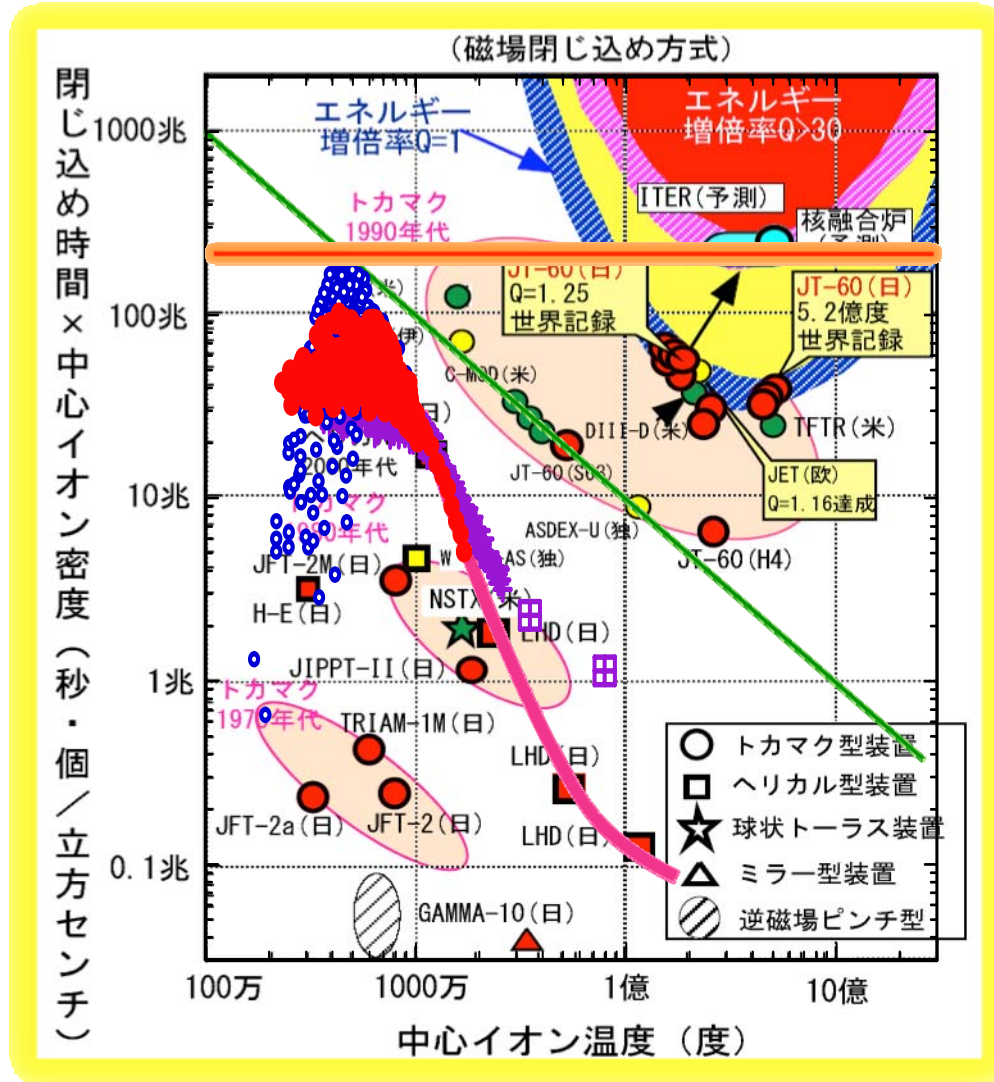


# LHDプラズマのパラメータ

	<i>Final Targets</i>	<i>Achievements</i>	
<b>Fusion triple product: <math>n\tau T</math></b>	<b><math>5 \times 10^{19} \text{ keVm}^{-3}\text{s}</math></b>	<b><math>5 \times 10^{19} \text{ keVm}^{-3}\text{s}</math></b>	
Ion temperature (average)	2.5 keV : $\langle T_i \rangle$	0.56 keV : $T_i(0)$	
Density	$1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	$3.9 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	
Energy confinement time	0.1 - 0.2 s	0.23 s	
<b>Electron Temperature: <math>T_e</math></b>			
Central $T_e$	10 keV	10 keV	15 keV
Density	$2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	$5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	$2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
<b>Ion temperature: <math>T_i</math></b>			
Central $T_i$	10 keV	13.5 keV	6.8 keV
Density	$2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	$3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ (Ar gas)	$2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (H gas)
<b>Beta: <math>\beta</math></b>	$\beta = 5 \%$	$\beta = 5.0 \%$	
Magnetic field strength	1 - 2 T	0.425 T	
<b>Steady state operation</b>			
Pulse length	3600 s at 3 MW	794 s at 1.05 MW 3268 s at 490 kW (Input Energy: 1.6GJ)	



# LHDプラズマのパラメータ

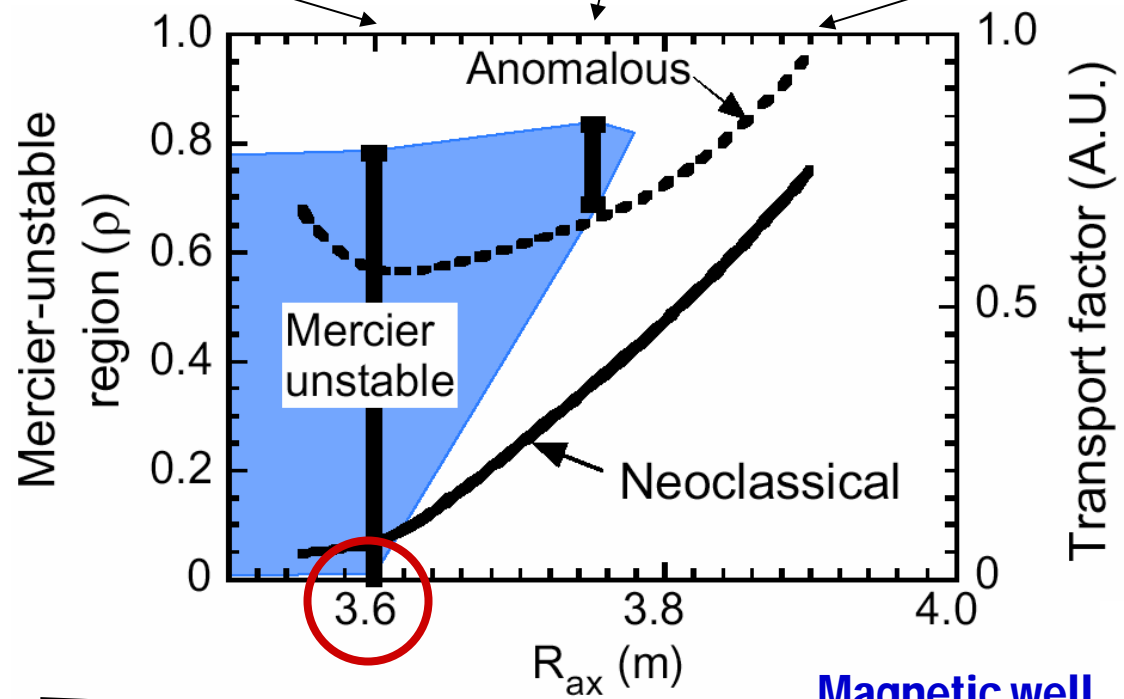
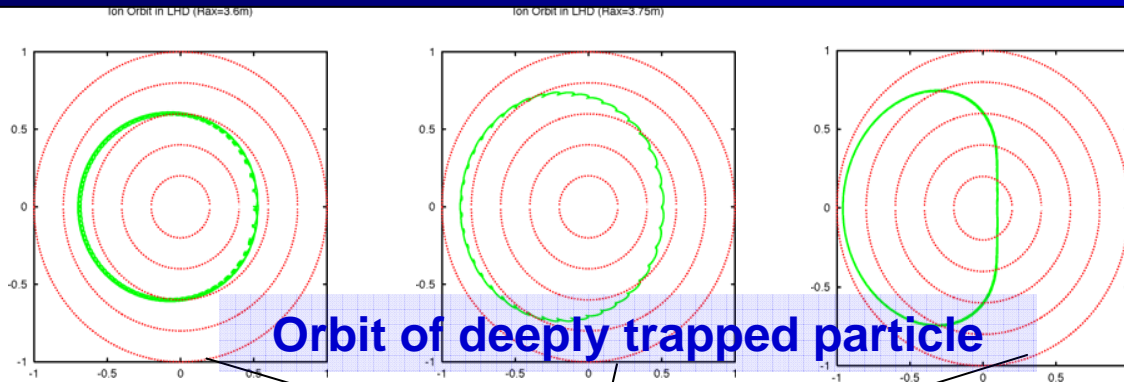


OLHDでは、IDB/SDCプラズマの発見により、高密度領域で高い3重積 (ntT) の進展が得られている。

OLHDの3重積は、C-ModやASDEX-Uなどの中型トカマク装置と同程度。



# プラズマ特性の磁気軸依存性



○粒子軌道と輸送は、内寄せ配位の方が良い。

○MHD安定性は磁気井戸となる外寄せ配位の方が良い。

○総合的な閉じ込めは、安定性と粒子閉じ込め特性の競合できる。高Ti、 $\beta$ などは内寄せ配位の方が良い傾向。



# LHD実験テーマ

## 2007年度実験テーマリーダー・サブリーダー一覧

	テーマ	リーダー	サブリーダー		
ミッション研究	1	高Wp、高密度、LIDを用いた閉じ込め改善	坂本隆一	小林政弘	
	2	高 $\beta$ 領域の拡大	大館 暁	榊原 悟	
	3	定常プラズマ保持と高性能化	斎藤健二	吉村泰夫	
	4	高イオン温度領域の拡大	横山雅之	永岡賢一	
物理テーマ研究	5	コアプラズマの熱・粒子輸送	福田 武司 (阪大)	田村直樹	舟場久芳
	6	周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用	大野哲靖 (名大)	増崎 貴	芦川直子
	7	MHD 平衡と安定性	中村祐司 (京大)	成嶋吉朗	渡邊清政
	8	高エネルギー粒子の物理	村上定義 (京大)	徳沢季彦	
	9	波動加熱物理	田中 仁 (京大)	伊神弘恵	関 哲夫
工学	10	装置工学実験	岡村哲至 (東工大)	柳 長門	



# Contents

---

LHD実験で精力的に行われている2つのタイプの放電について紹介する。

○高イオン温度プラズマ

○Internal Diffusion Barrier (IDB) /  
Super Dense Core (SDC) プラズマ





# 高イオン温度プラズマ

---

- 低エネルギービームによるイオン加熱
- 達成イオン温度の進展
- 高イオン温度の高密度領域への拡大
- イオン温度分布と輸送解析:閉じ込め改善の実現
- 不純物ホールの形成



# Installation of P-NBI for Ion Heating

Before 9<sup>th</sup> campaign of LHD;

N-NBI with high beam energy of 180keV  
→ Low ion heating power



The ion heating experiments

High Z discharge →  $T_i(0)=13\text{keV}$

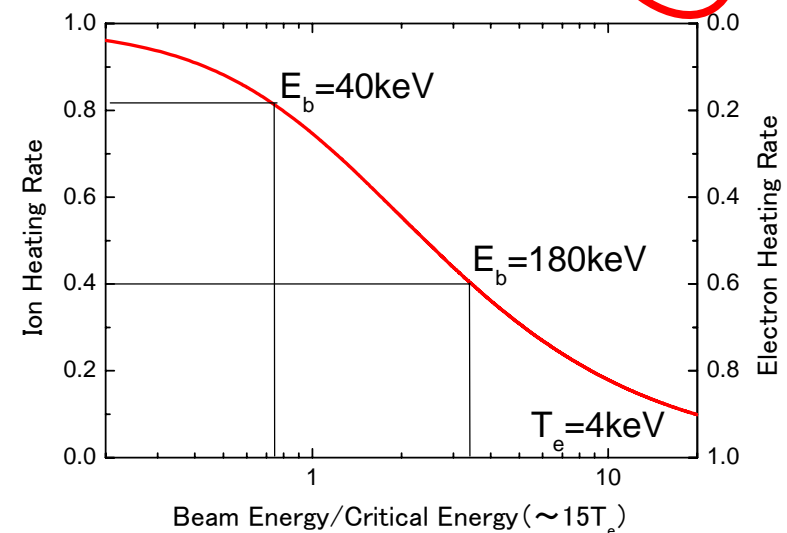
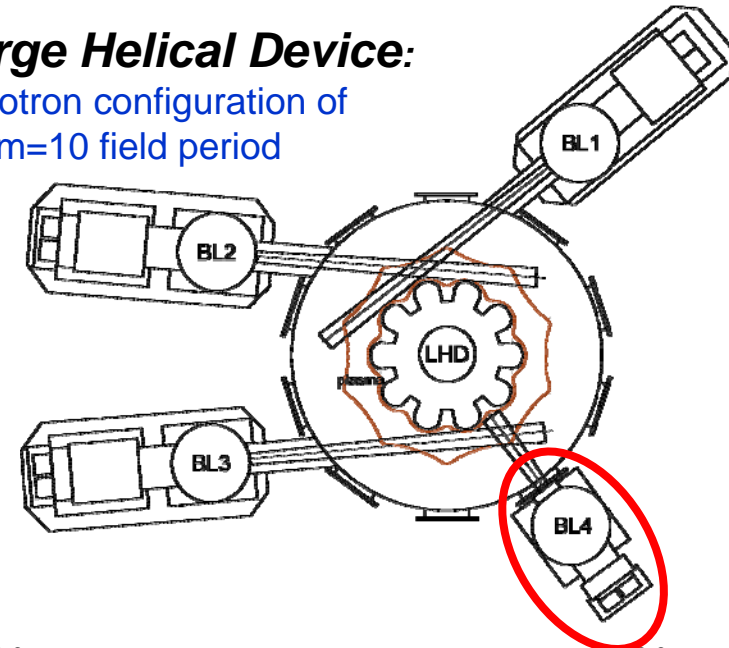
For ion heating experiments in low Z discharge, the low energy and high power NBI was required



Installation of Perpendicular NBI (40keV) in 9<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup> campaigns of LHD

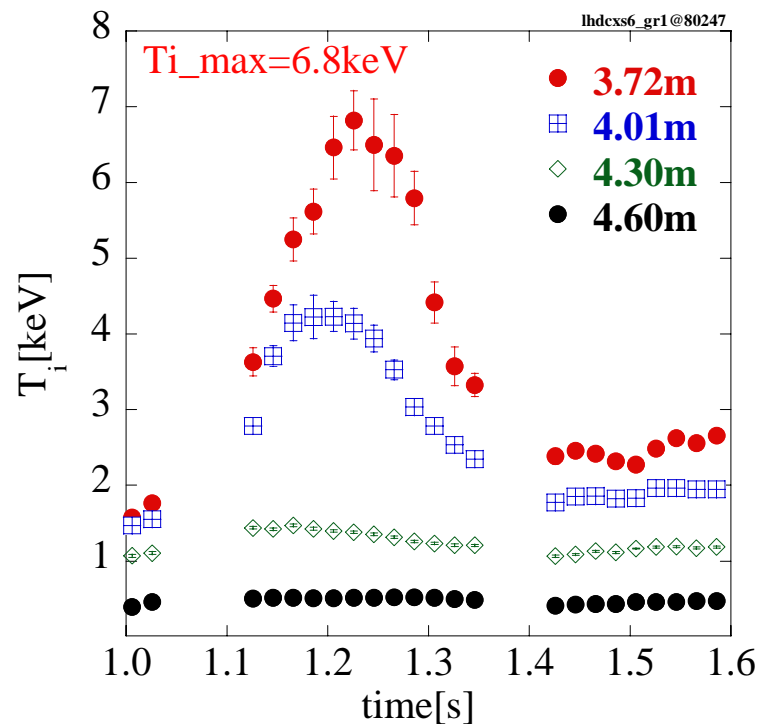
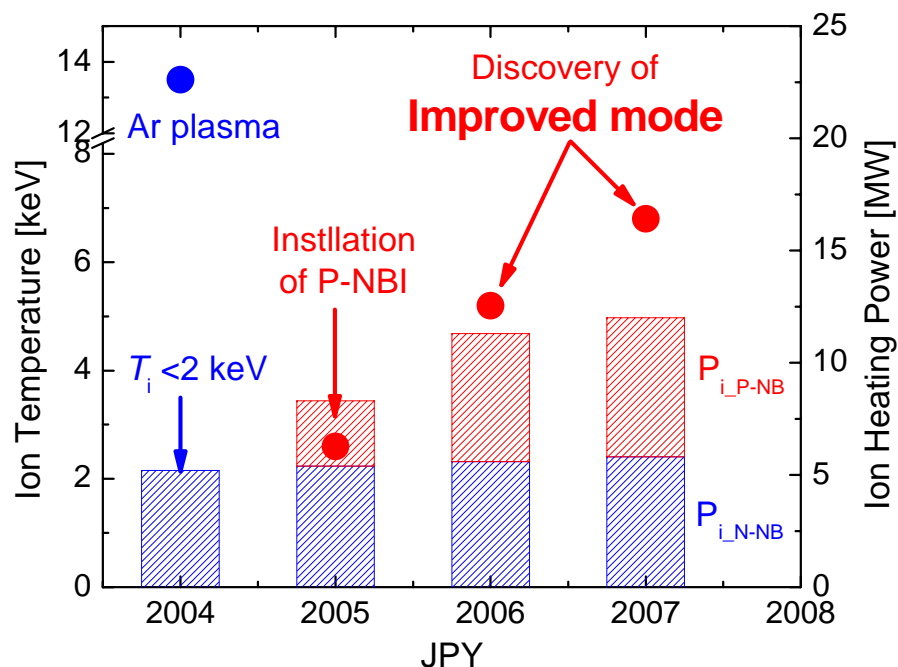
**Large Helical Device:**

Heliotron configuration of  $l=2/m=10$  field period





# 高Tiプラズマの進展と改善モードの発見



○イオン加熱パワーの増加に伴い、イオン温度領域が飛躍的に拡大。

-  $T_{i0} = 6.8$  keVの実現

○OCXSによるイオン温度分布計測

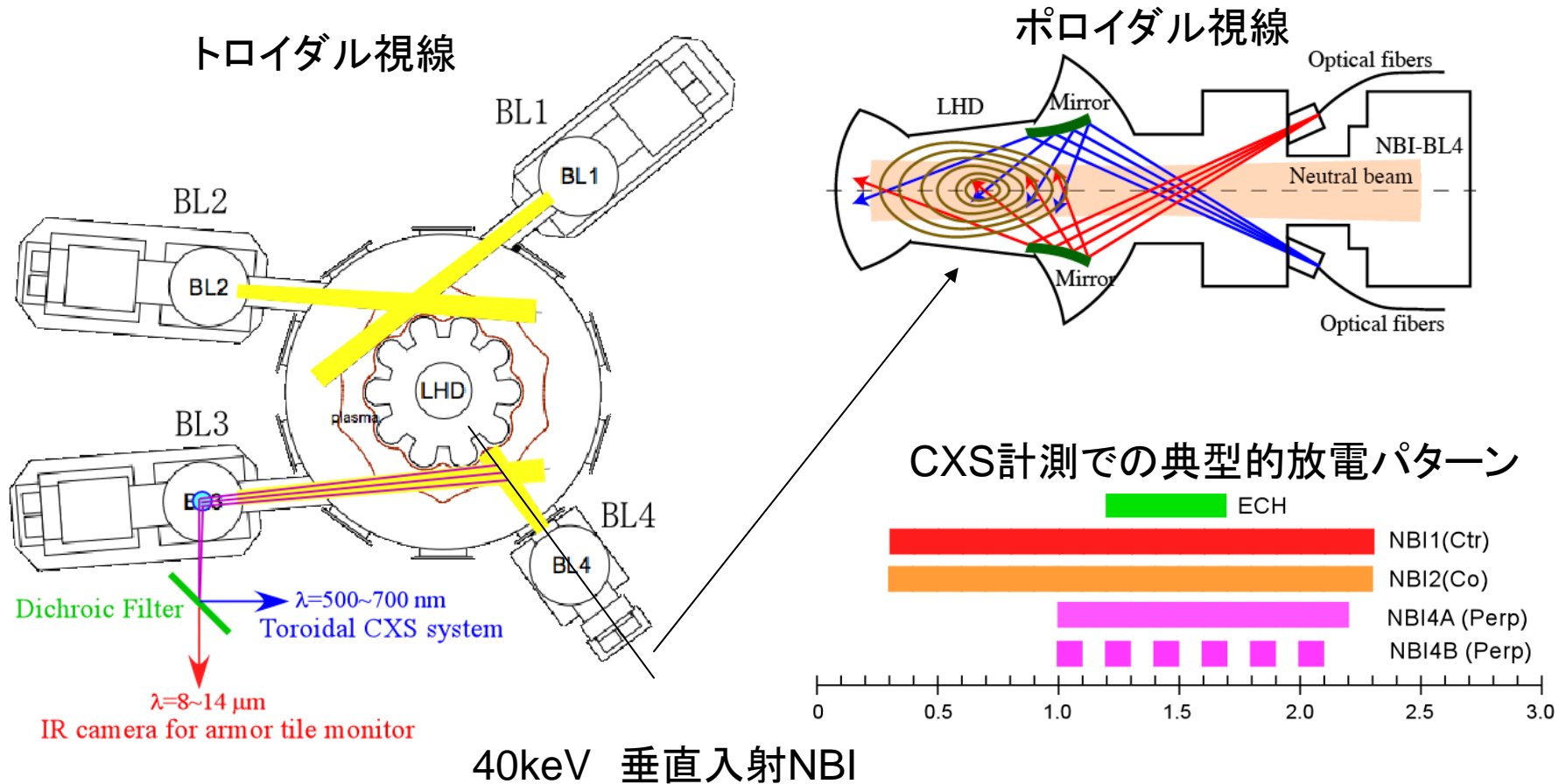
- イオン閉じ込めの改善

- 不純物ホール形成

# 第10サイクルにおける荷電交換分光計測



ポロイダル視線に加え、トロイダル視線を用いた荷電交換分光計測を行った

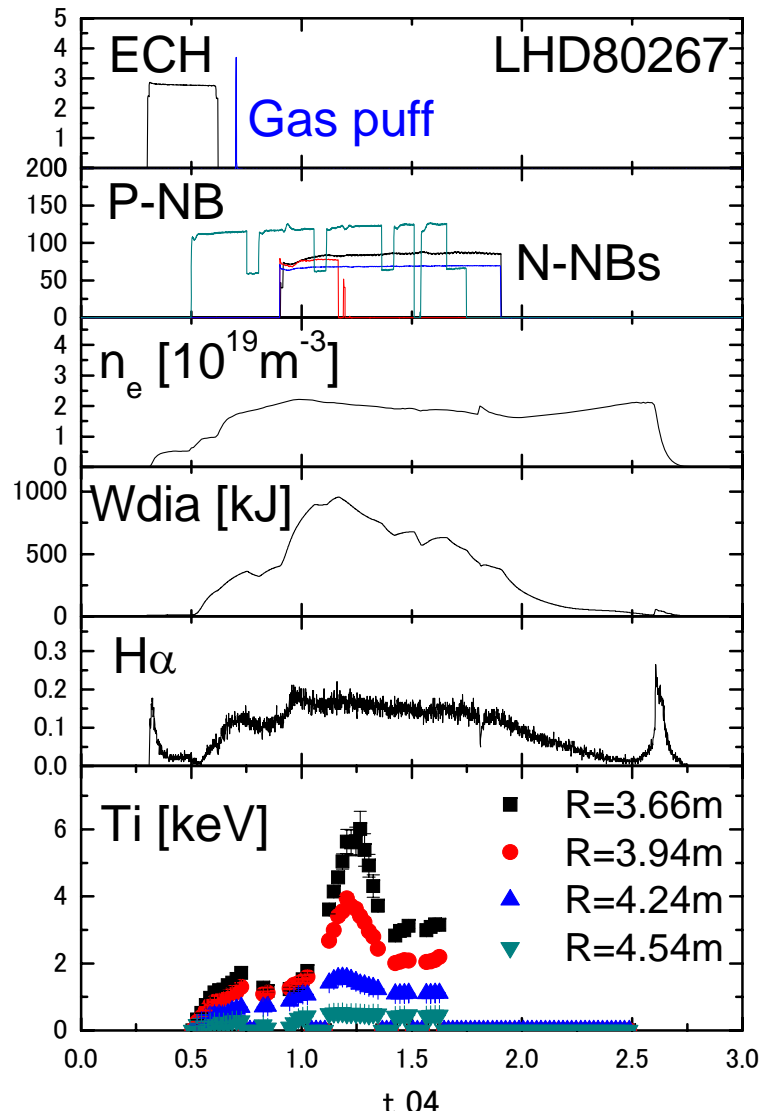


Op-NBIをプローブビームとして、**イオン温度分布の計測**が可能となった。

○垂直入射NBI4は、100%/50%のモジュレーションを行うとことで背景信号を取得する

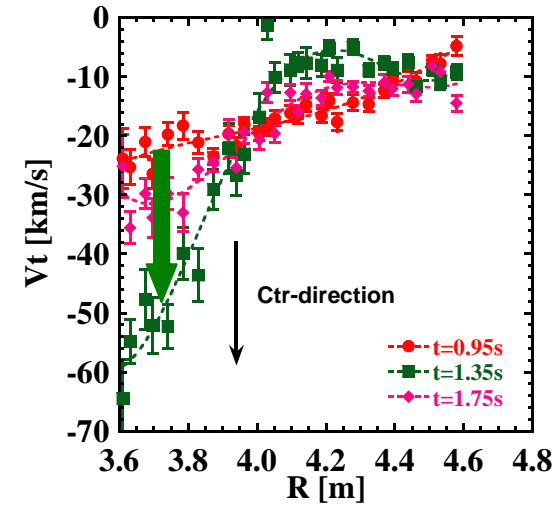
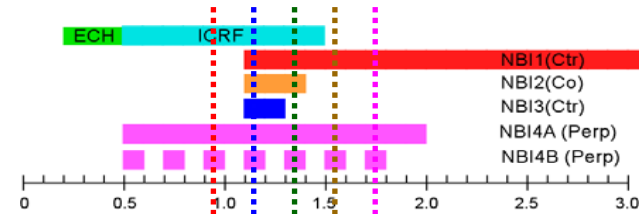
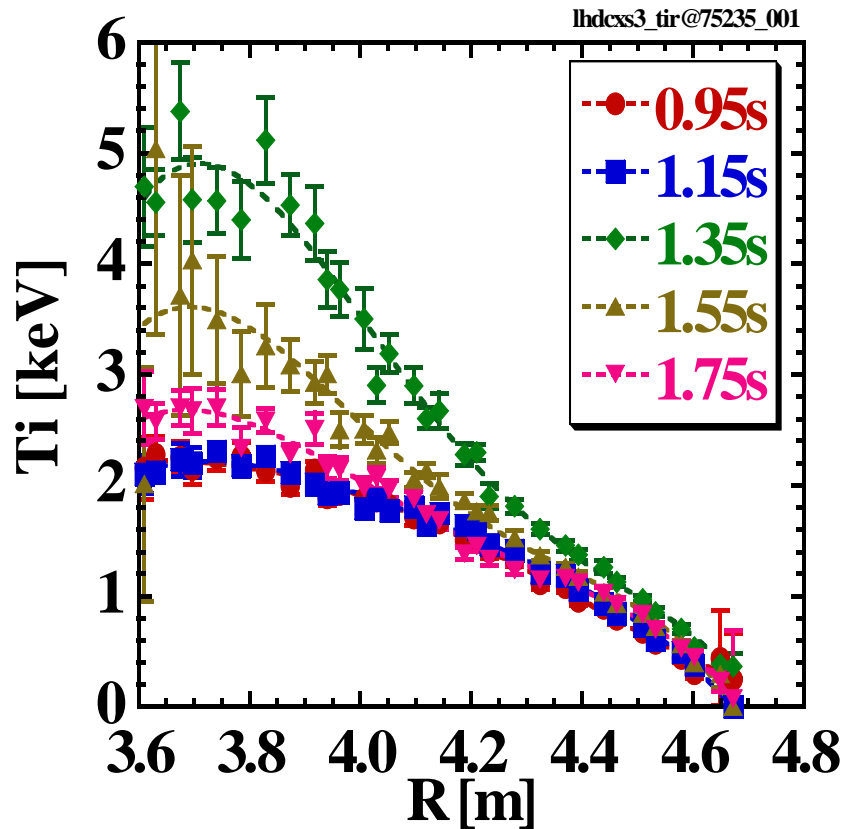


# 高Ti放電



- P-NBは、イオン温度計測の背景光取得のために100%(250ms) & 50%(50ms)のモジュレーション運転。
- P-NB加熱プラズマにN-NB加熱を重畳すると**イオン温度と蓄積エネルギーが急激に増加し、その後減少する。**
- 高Ti維持時間 ( $\tau$ :  $Ti > 0.8 Ti_{max}$ ) は、~0.12s。** エネルギー閉じ込め時間(~0.05s)の2~3倍程度。
- ターゲットプラズマは、N-NB保持よりもP-NB保持のほうがイオン温度上昇は顕著。密度分布の影響が示唆。
- イオン温度の上昇は、非常にデリケート。P-NBのモジュレーションのタイミングやNBパワーなどへ強く依存。

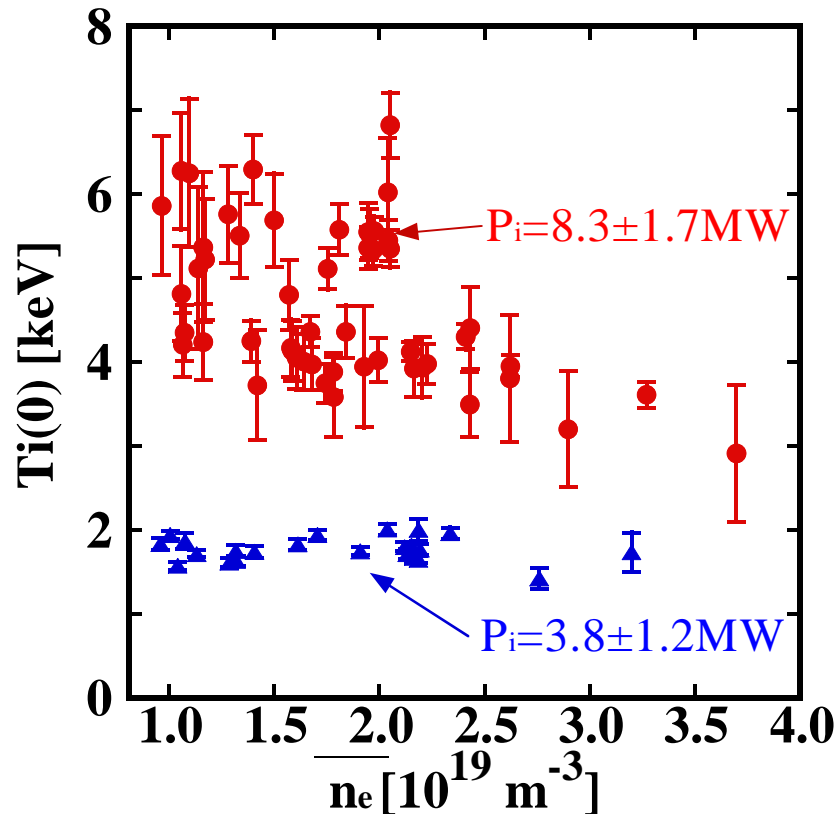
# 中心ピークしたイオン温度分布



○NBIの追加熱後、急峻な勾配を持つ中心ピークしたイオン温度が実現する。  
○その後、イオン温度は下がってしまう。



# 到達イオン温度の密度依存性



○イオン加熱パワーの増加によりイオンの閉じ込め改善を実現し、**中心イオン温度6.8keVを $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の線平均密度で達成した。**

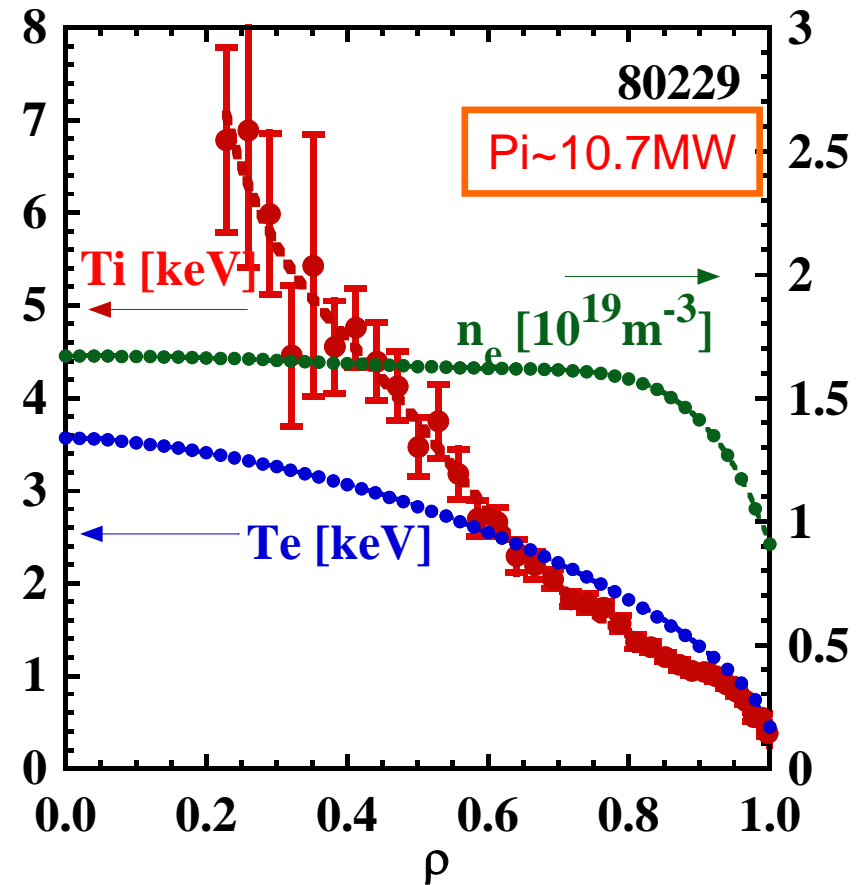
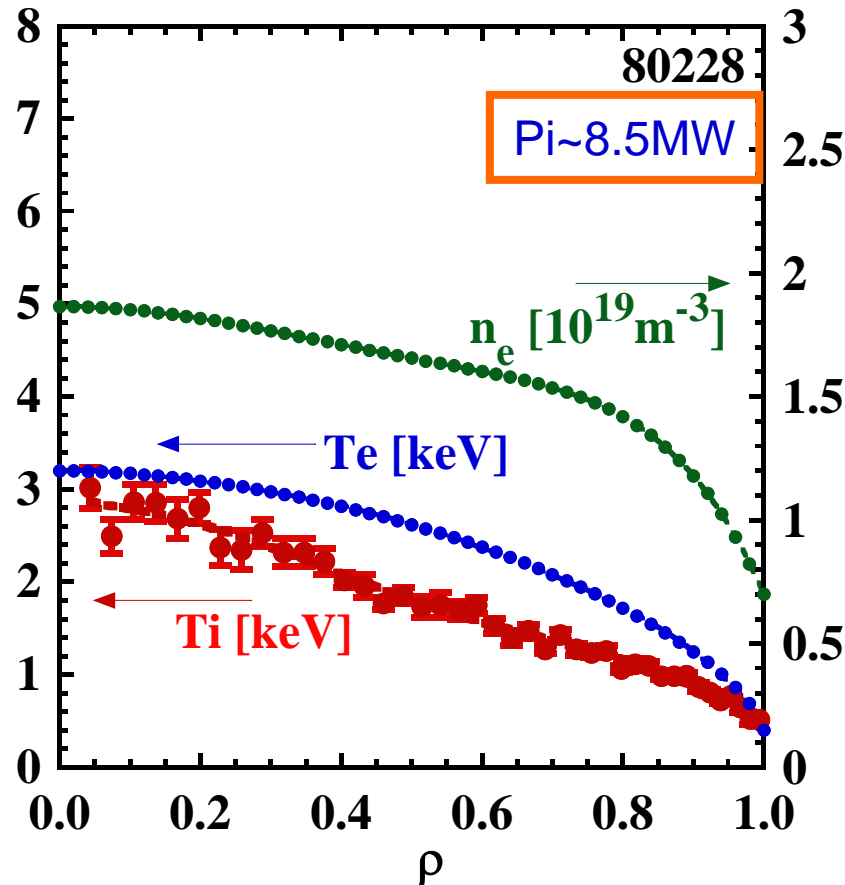
○到達イオン温度のNBの直接加熱パワーの依存性は、

$$T_i \propto P_i^\alpha : \alpha = 1.0 \sim 1.3$$

○ガスパフやペレット入射を用いて高イオン温度を高密度領域へ拡大し、 $3.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の線平均密度で3keVを達成した。



# 加熱パワーによる比較

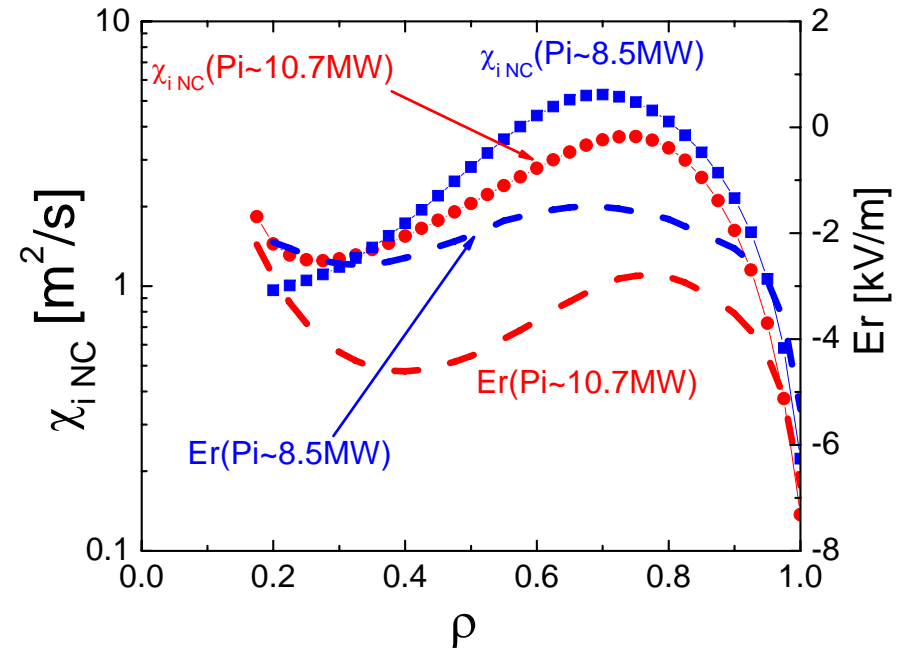
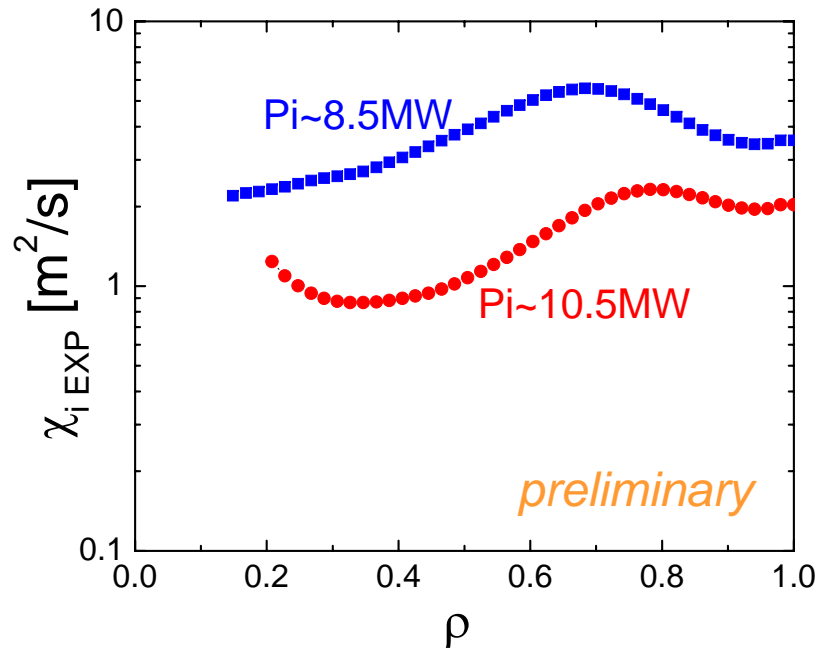


- NBI加熱パワーのみが異なる連続するショットで、到達イオン温度が劇的に変化。
- 加熱パワーの増加により、輸送改善が実現。
- 密度と電子温度の変化は、小さい。



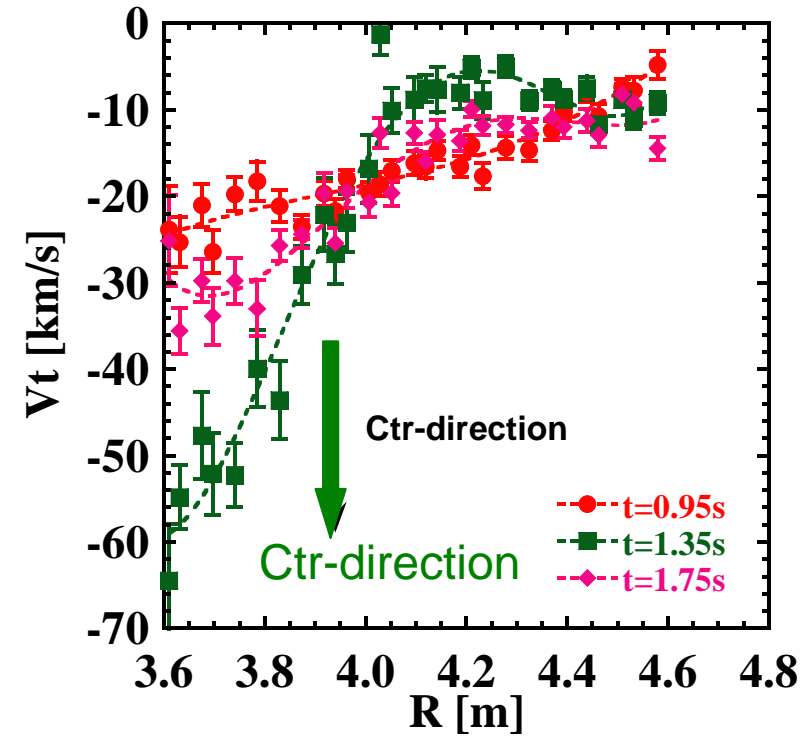
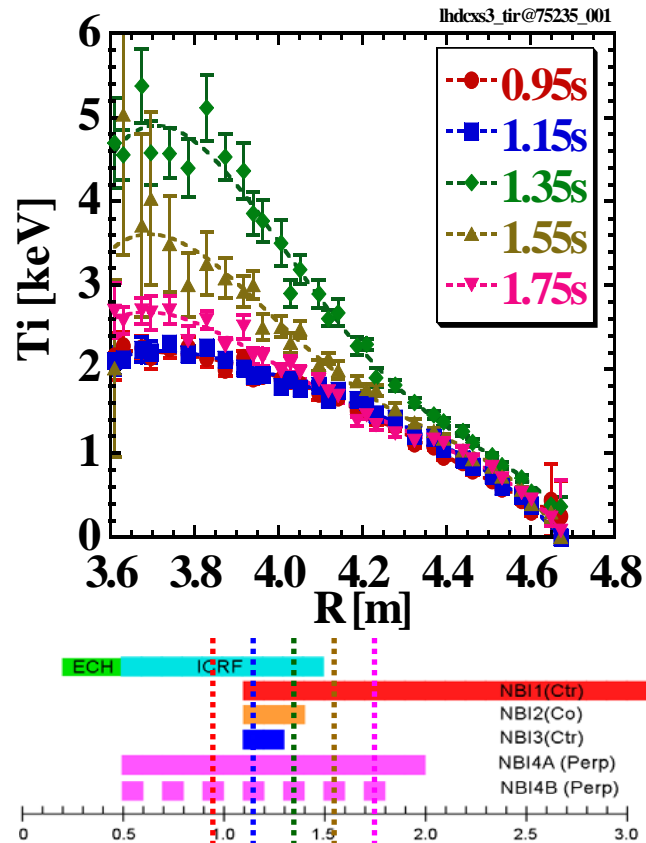


# 熱輸送解析



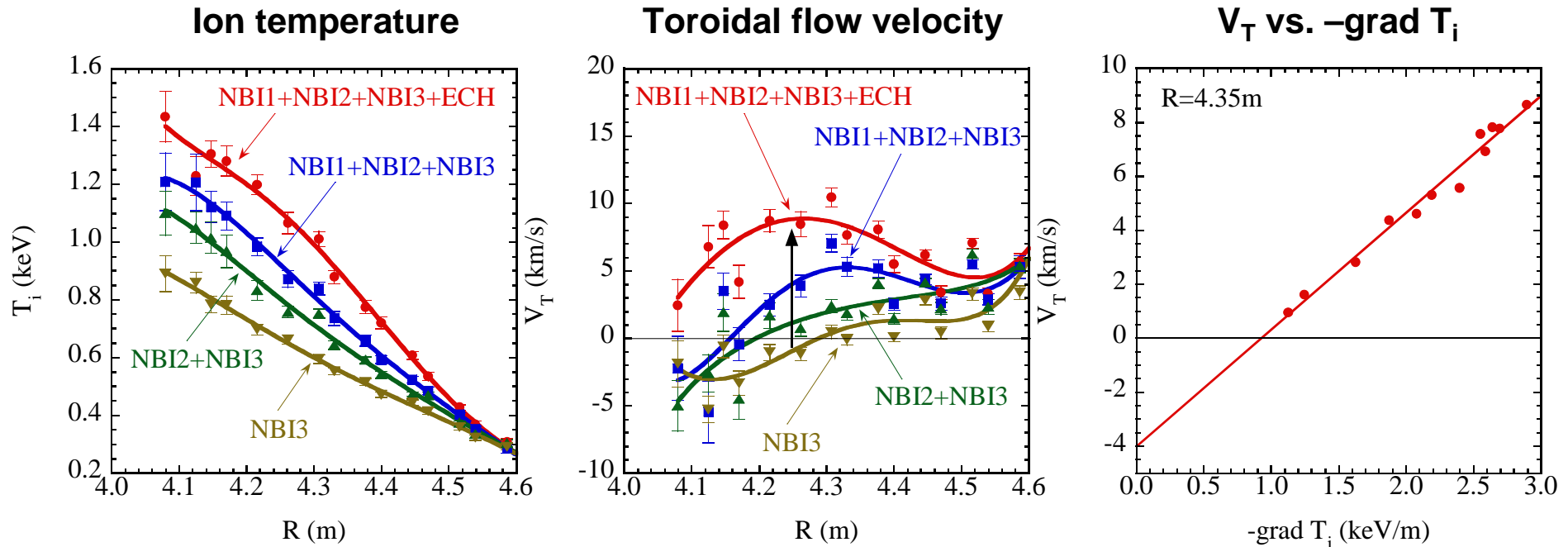
- イオンの熱輸送係数は、加熱パワーの増加に伴って、全領域で低減。
- 新古典輸送の変化は、小さい。
- 新古典径電場は、全領域で負電場(イオンルート)。
- 径電場は、加熱が大きい場合の方が大きい。負電場による輸送低減(イオンルートシナリオ)を示唆。

# トロイダル回転の観測



○イオン温度の上昇に伴って、**大きなトロイダル回転**が観測される。  
 ○回転方向は、接線入射NBIの向きに支配される。

# Ti 勾配駆動のトロイダル回転

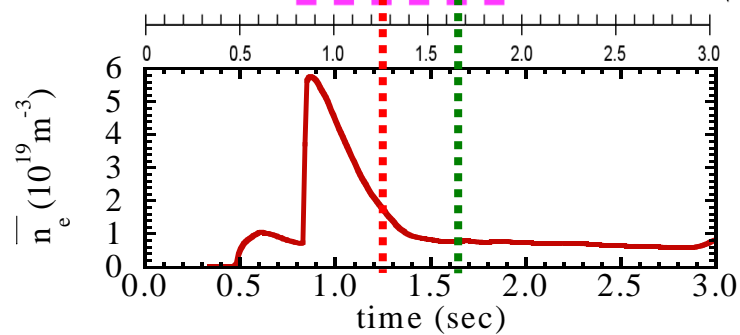
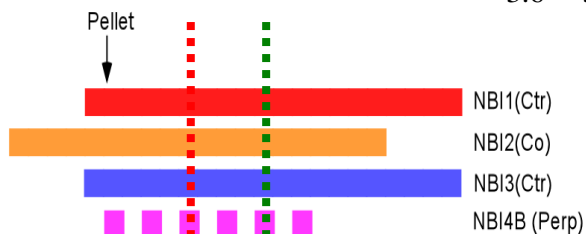
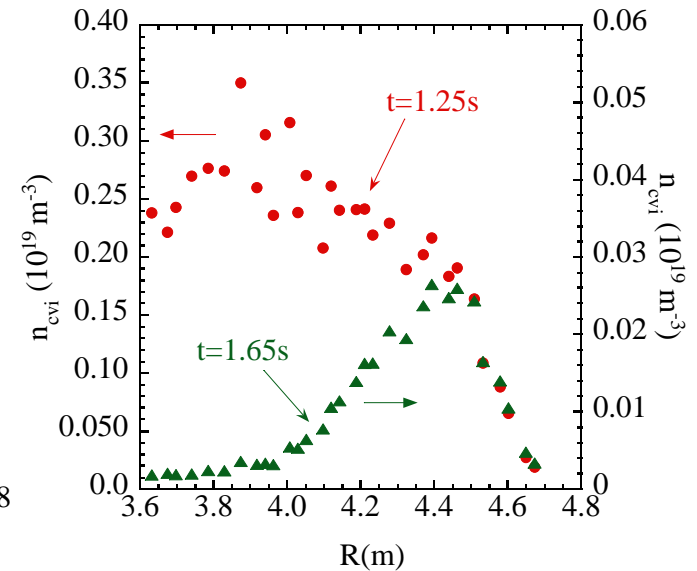
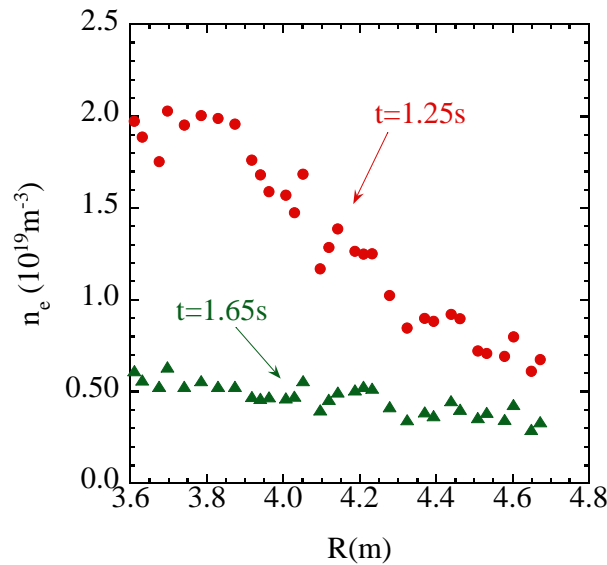
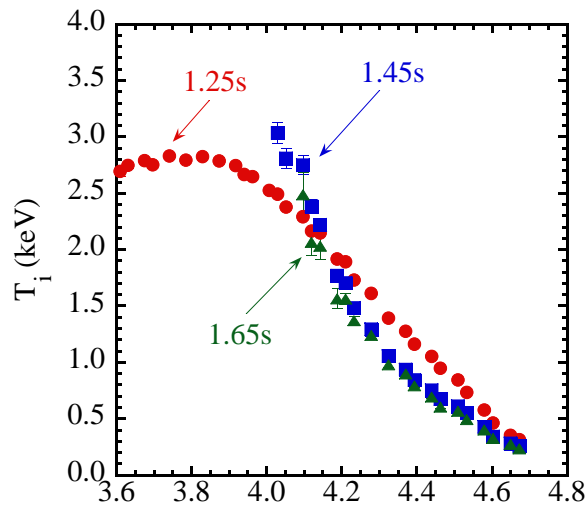


- NBIパワースキャンを行い、イオン温度とトロイダル回転の変化を調べた。
- トロイダル回転は、イオン温度の上昇に伴いCo方向に回転する傾向が得られた。
- このとき、径電場の変化はほとんどなし。

LHDで観測されているトロイダル回転: 接線NBI駆動、径電場駆動、イオン温度勾配駆動

$R_{ax}=3.75$ m  $B_t=2.64$ T  $\gamma=1.254$  Bq=100%

# 不純物ホールの観測

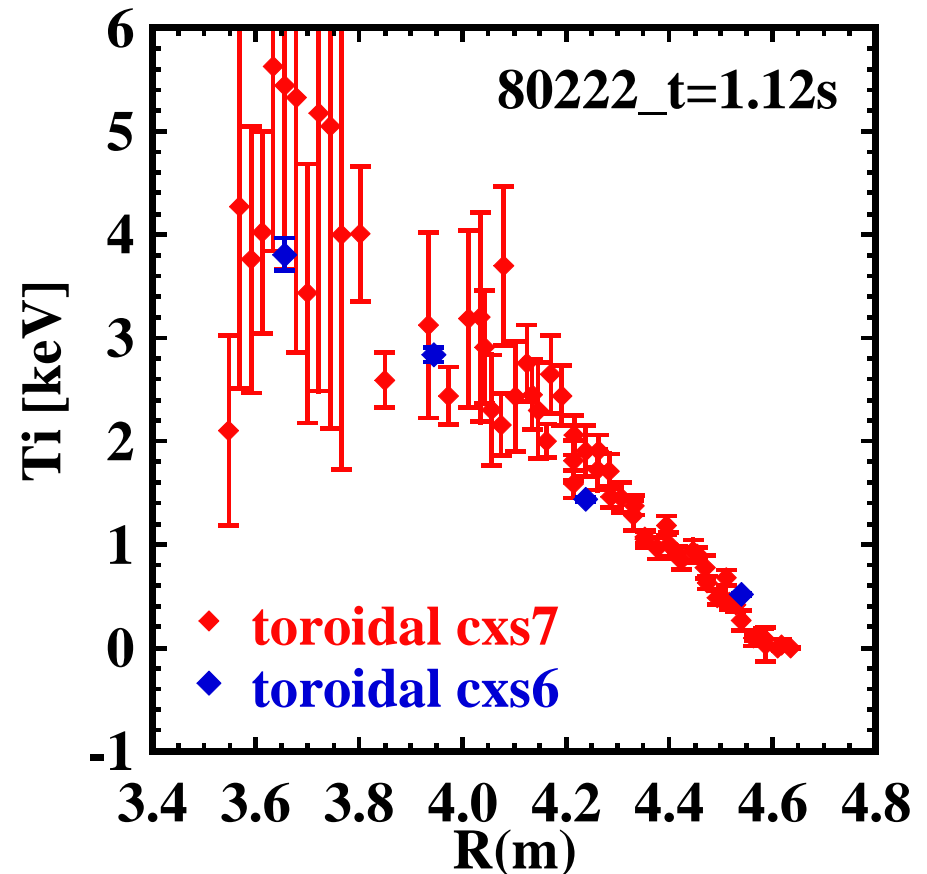
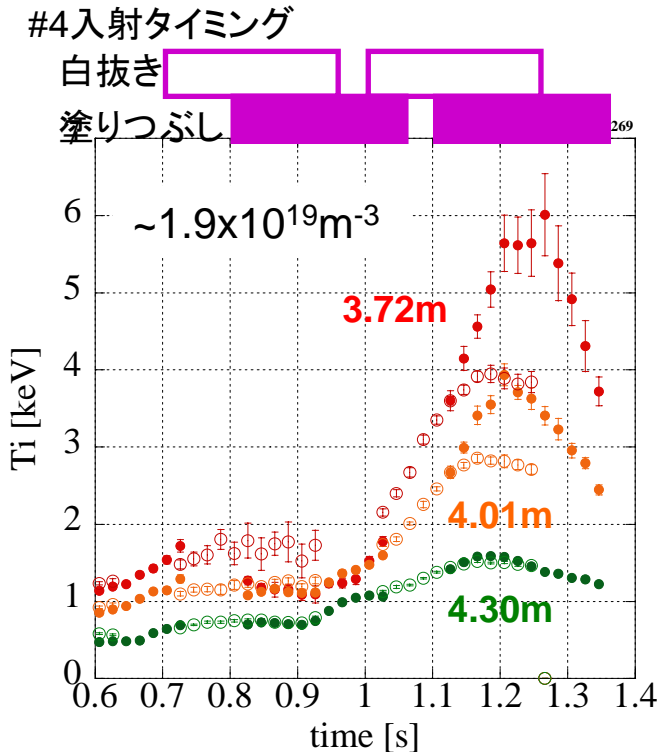


- カーボン不純物の発光強度がイオン温度の上昇とともに急激に減少。不純物ホールの形成。
- 高いTiの計測が困難。
- 一般的に不純物の蓄積が懸念されるEr<0 (イオンルート)での不純物ホール形成。
- 計測系の改良が必要。



# さらに高いイオン温度を目指して

- 計測系の改良。見えなかった(測れなかった)ものを測る。
- プラズマ放電シナリオの最適化
  - 密度分布制御
  - Ti/Te比の最適化
  - ...
- 壁条件の作成(低リサイクリング化)





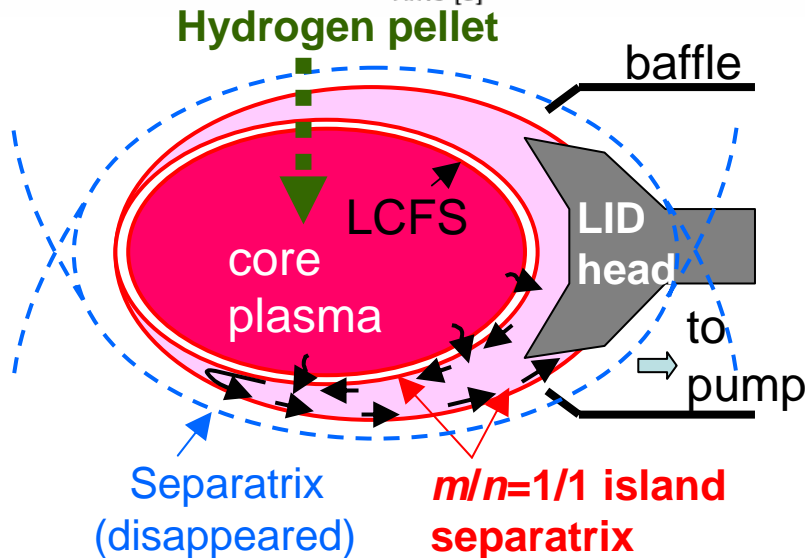
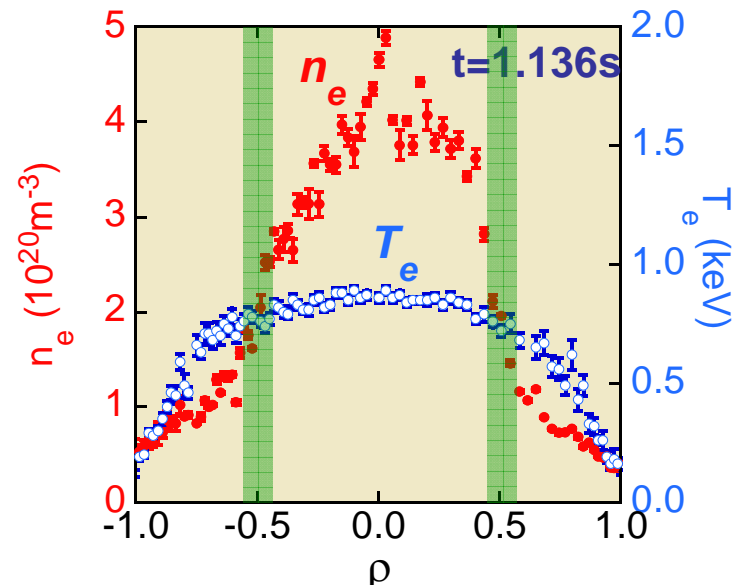
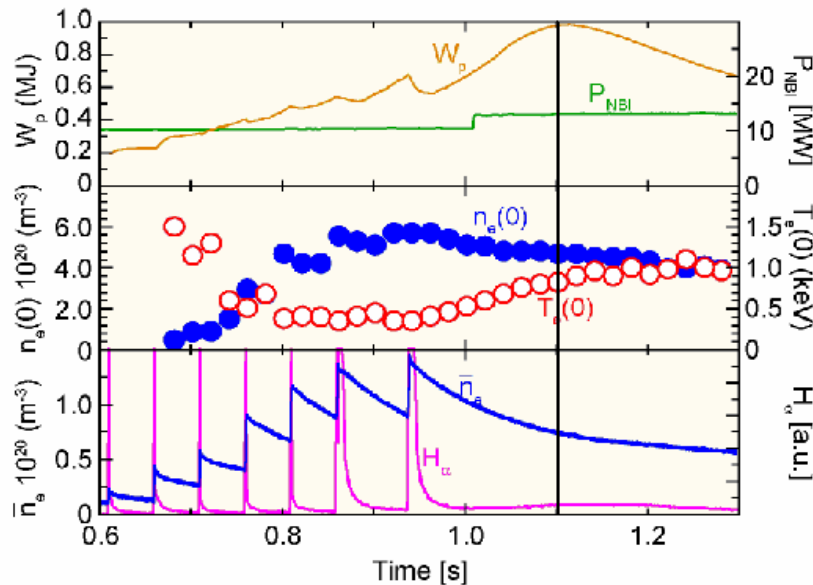
# Internal Diffusion Barrier/ Super Dense Core (IDB/SDC) プラズマ

---

- Internal Diffusion Barrier (IDB) / Super Dense Core (SDC) プラズマ  
と Core Density Collapse (CDC)
- 高中心圧力
- 高中心密度
- 高蓄積エネルギー
- 高核融合三重積



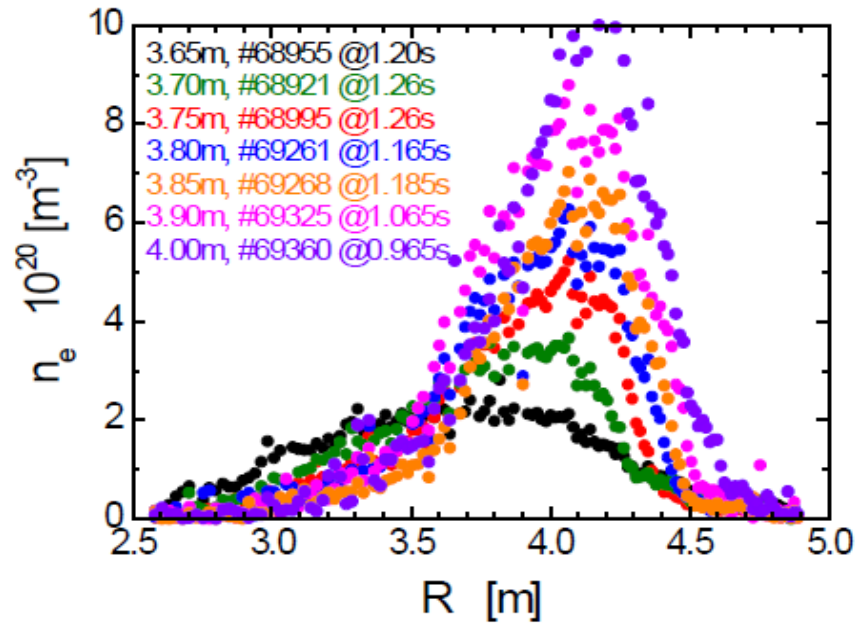
# IDB/SDC plasma with LID



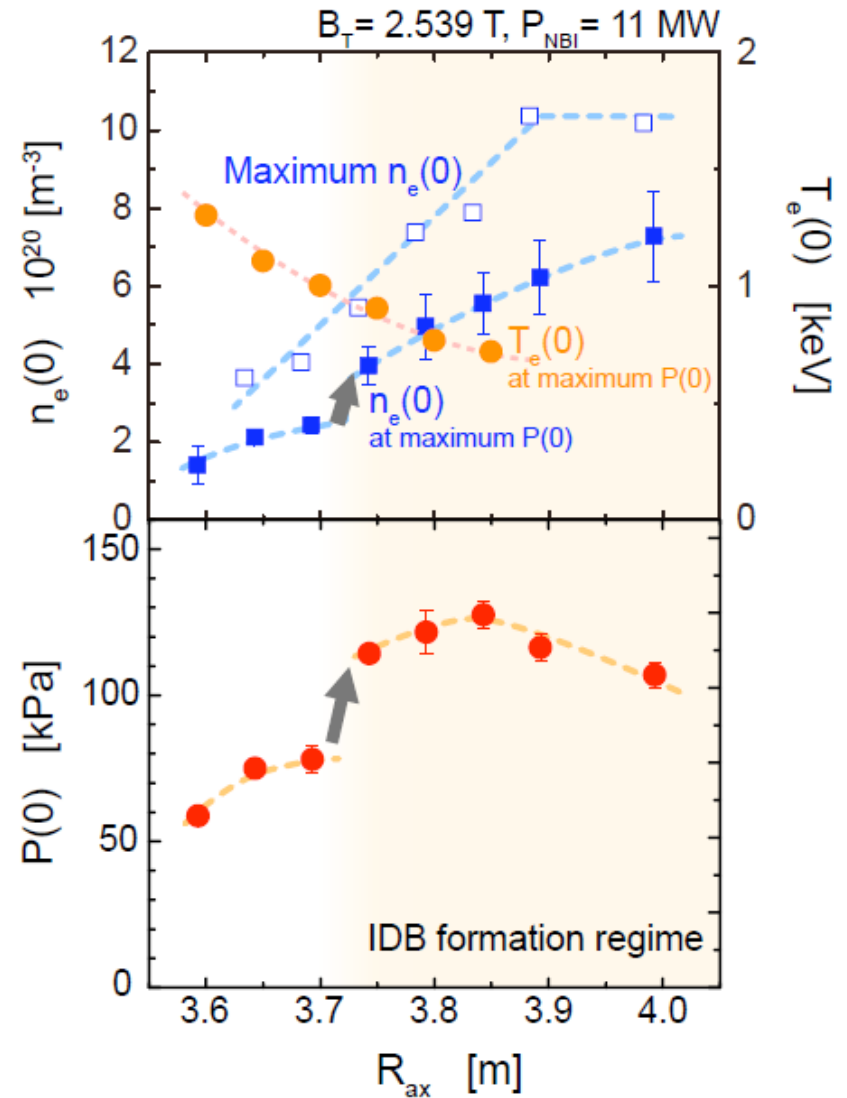
- Local Island Divertor (LID) 配位で IDB 形成を観測。
- ペレット入射による中心粒子供給により、 $\rho \sim 0.5$  付近に急峻な密度勾配 (IDB)。
- 中心の密度は、 $5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  に到達 (SDC)。



# IDB/SDC plasmas with HD



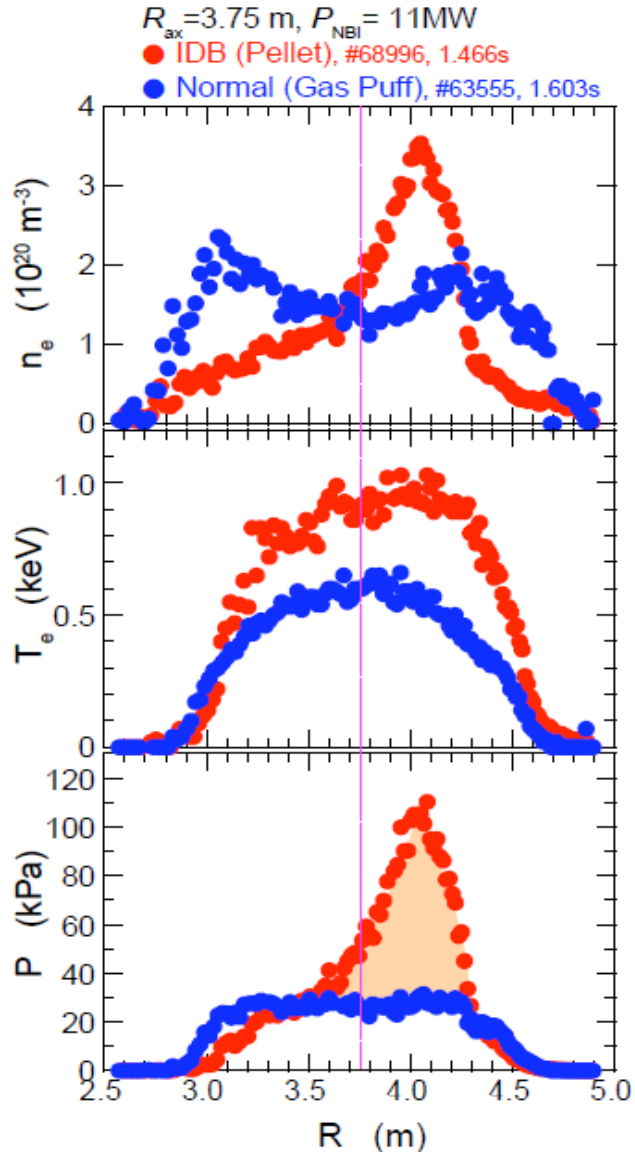
- ヘリカルダイバータ配位においても外寄せ ( $R_{ax} > 3.7\text{m}$ ) 配位でIDB形成。
- リサイクリング低減が重要。
- 中心圧力は  $R_{ax} = 3.75\text{m}$  で遷移的に増加。



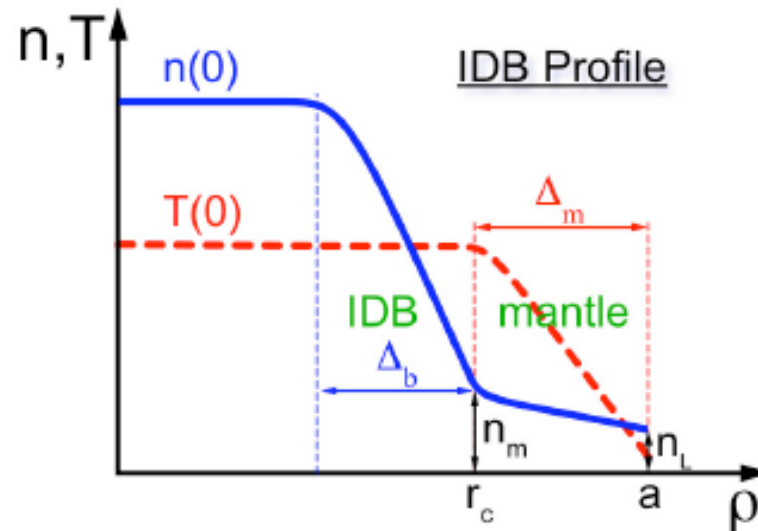




# IDB/SDCプラズマの構造

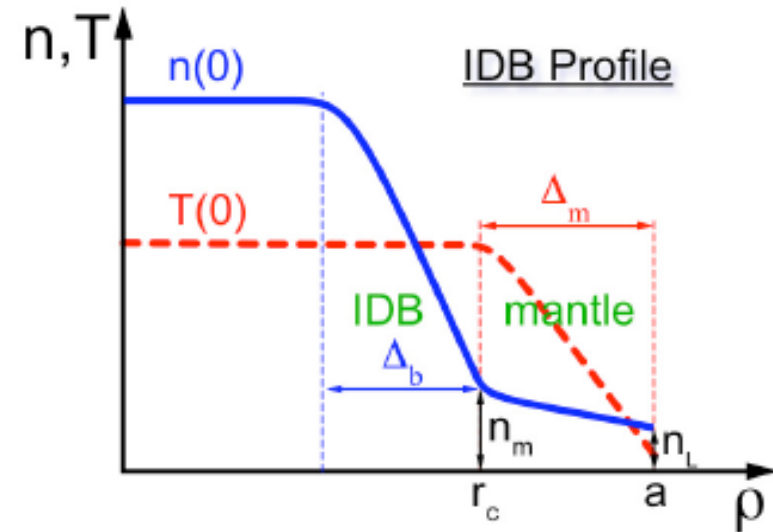
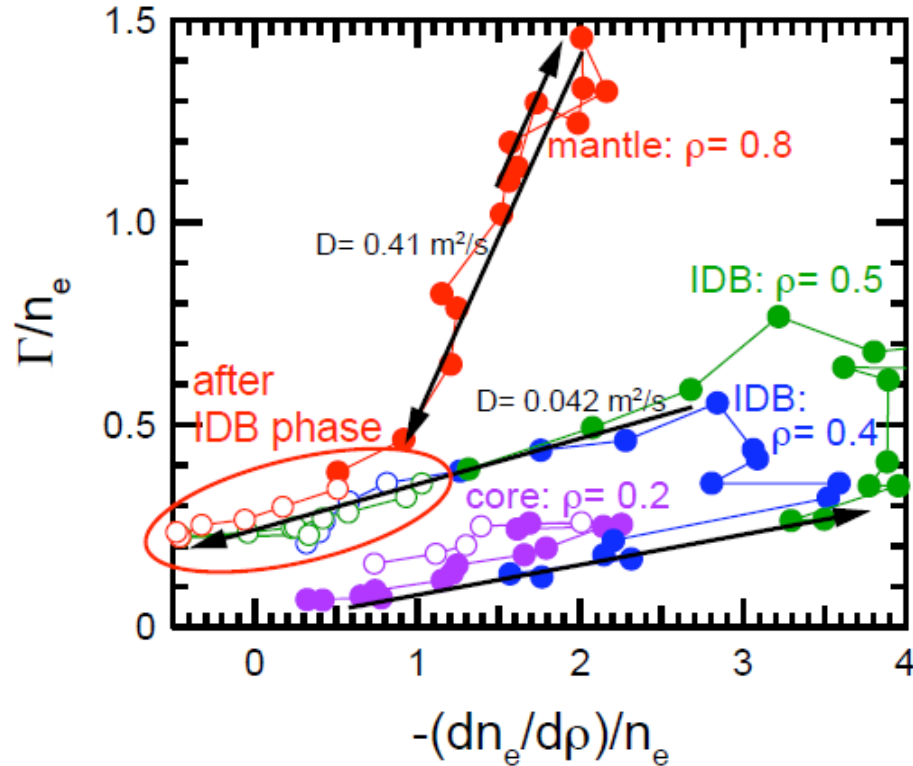


- 通常的气体パフ放電では、凹型密度分布。
- ペレット入射により中心ピークした密度分布の形成
- 周辺部の密度が低いIDBプラズマでは電子温度勾配が大きく、コア部の電子温度が高い。
- 結果的にIDBプラズマの中心圧力は、飛躍的に増大。





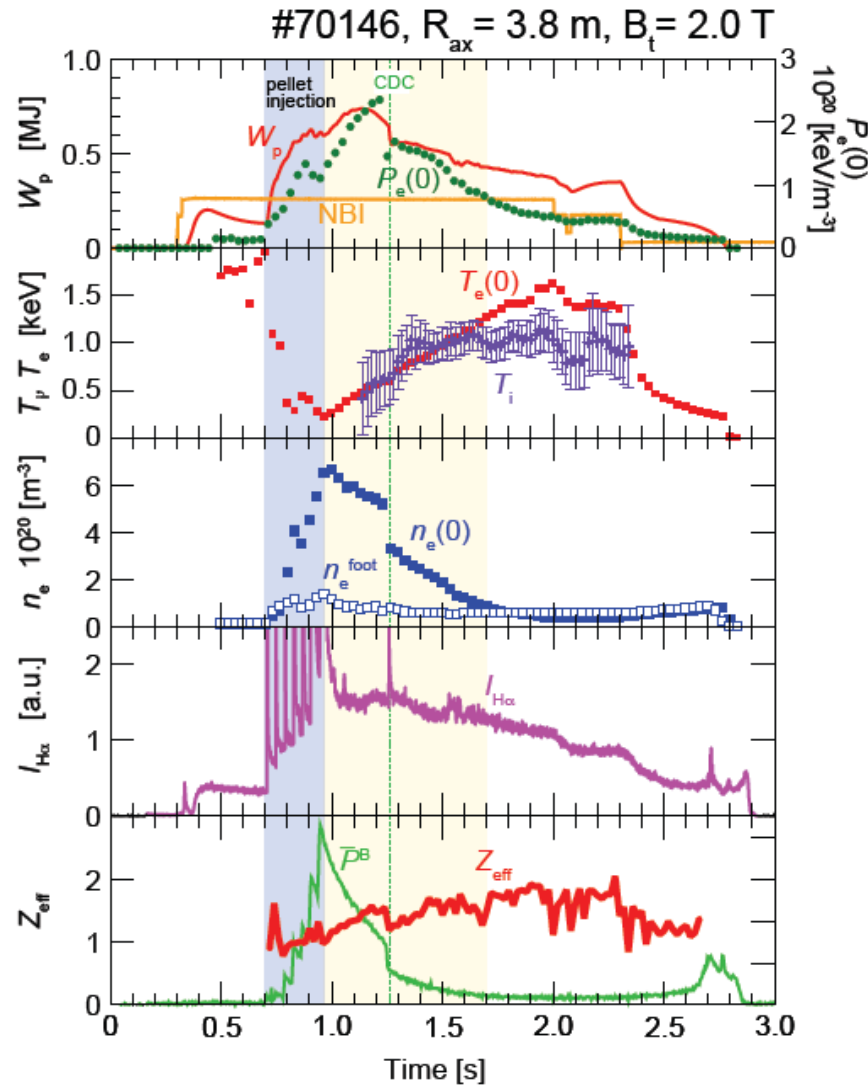
# 粒子輸送の特性



- コア部の輸送は、高い密度領域でも低いレベルを保つ。
- 周辺部の輸送が大きくなり、周辺部に低密度領域(マントル)が形成。
- マントル部で電子温度勾配が大きくなり、コア部の高電子温度を維持。



# Core Density Collapse



○連続ペレット入射を用いたコア粒子供給により密度の増加。

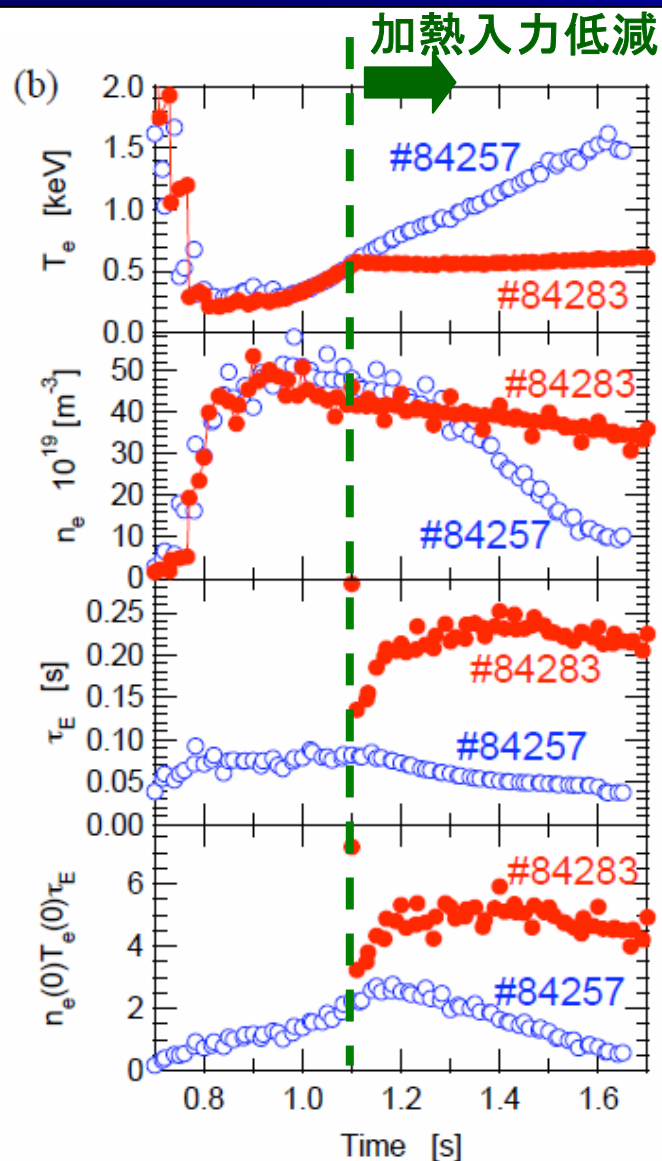
○ペレット入射後、周辺部の密度の急激な減少と温度のリカバリーにより中心圧力の増加 (IDB 形成)。

○しばしば、中心圧力の突発的減少 (CDC) が起こる。大きなシャフトシフトが影響していると考えられる。

○不純物の蓄積は、観測されていない。放電中に  $Z_{eff} = 1 \sim 2$  を維持。

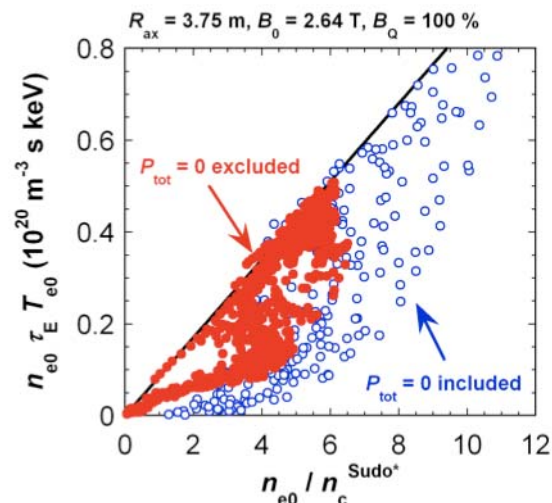
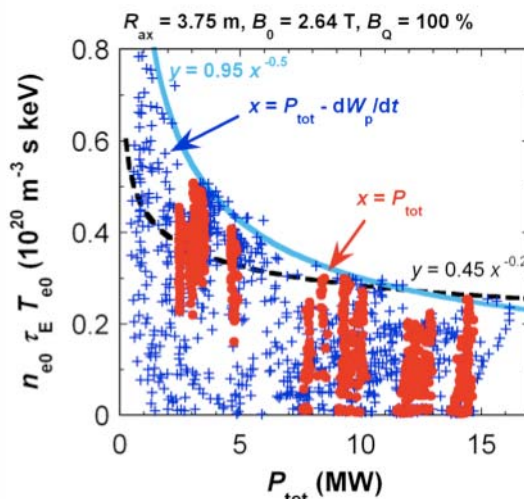


# 加熱の最適化による高核融合三重積



○高密度IDBプラズマへの加熱入力を放電中に低減し、 $\tau E$ の増大を図った。(アニーリング・オペレーション)

○加熱入力低減後も、密度・温度はほぼ一定に保たれるため、加熱入力低減により $\tau E$ が増大。その結果、 $n\tau T=0.5 \times 10^{20} \text{keVsm}^{-3}$ を300ms間維持することに成功。





# IDBプラズマの持つ記録

## 第10サイクルまでの成果

- 中心圧力  $P(0)$ : 130kPa
- 中心密度  $n_e(0)$ :  $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 核融合三重積  $n\tau T$ :  $0.44 \times 10^{20} \text{ keV s m}^{-3}$
- プラズマ蓄積エネルギー  $W_p$ : 1.44 MJ

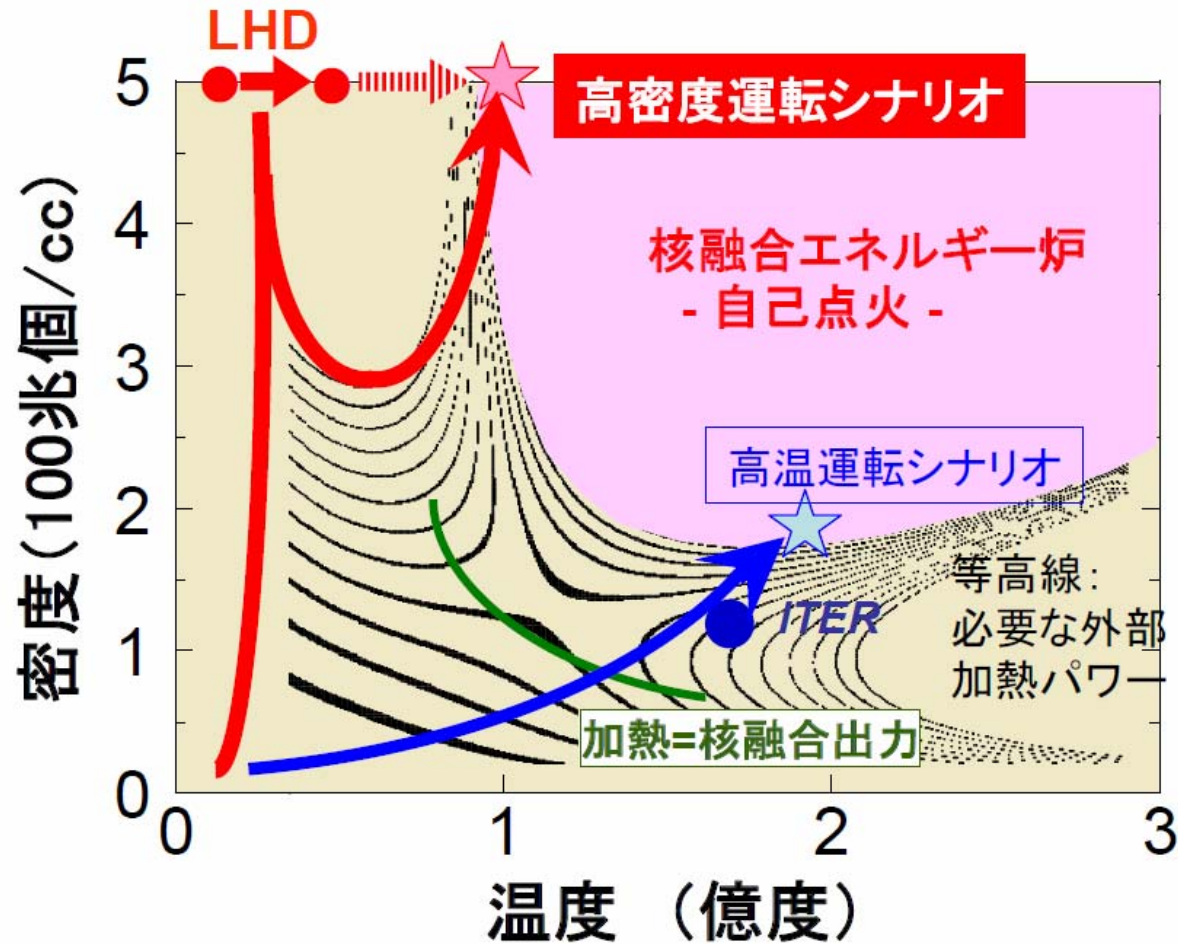


## 第11サイクルでの成果

- 中心圧力  $P(0)$ : 140kPa
- 中心密度  $n_e(0)$ :  $1.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 核融合三重積  $n\tau T$ :  $0.5 \times 10^{20} \text{ keV s m}^{-3}$  (300ms維持)
- プラズマ蓄積エネルギー  $W_p$ : 1.62 MJ



# 高密度運転シナリオ



○ヘリカル型は高密度運転に適していることを利用した運転シナリオ。



# まとめ

	テーマ	リーダー	サブリーダー
ミッション研究	1 高Wp、高密度、LIDを用いた閉じ込め改善	坂本隆一	小林政弘
	2 高 $\beta$ 領域の拡大	大館 暁	榊原 悟
	3 定常プラズマ保持と高性能化	斎藤健二	吉村泰夫
	4 高イオン温度領域の拡大	横山雅之	永岡賢一
物理テーマ研究	5 コアプラズマの熱・粒子輸送	福田 武司 (阪大)	田村直樹 舟場久芳
	6 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用	大野哲靖 (名大)	増崎 貴 芦川直子
	7 MHD 平衡と安定性	中村祐司 (京大)	成嶋吉朗 渡邊清政
	8 高エネルギー粒子の物理	村上定義 (京大)	徳沢季彦
	9 波動加熱物理	田中 仁 (京大)	伊神弘恵 関 哲夫
工学	10 装置工学実験	岡村哲至 (東工大)	柳 長門

