

第10回若手科学者によるプラズマ研究会
2007年3月14-16日 於原子力研究開発機構那珂研

LHDにおける最近の実験結果と輸送研究について

田中謙治、LHD実験グループ

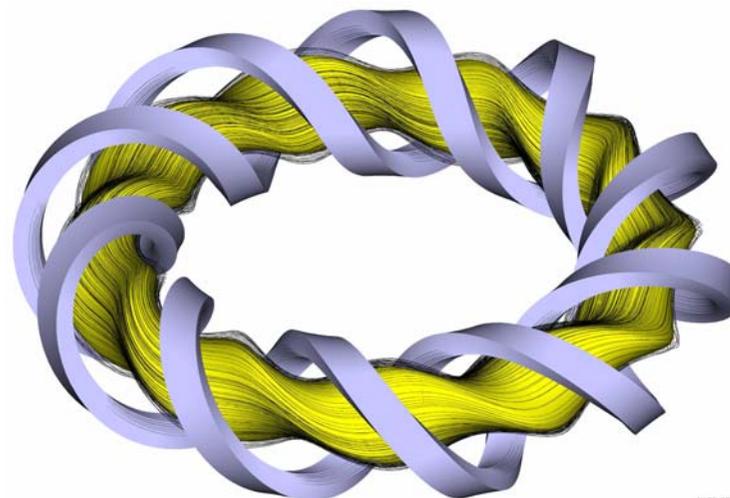
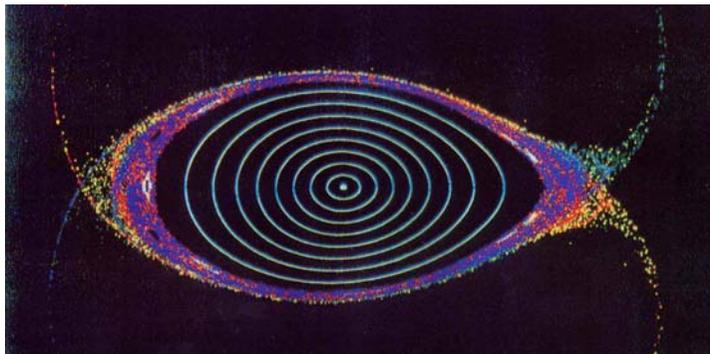
核融合科学研究所

発表のアウトライン

1. LHDの紹介
2. 最近の実験成果について
 - i) 定常実験
 - ii) 高ベータ実験
 - iii) 高密度ペレット放電
3. LHDにおける輸送研究
4. まとめと今後の課題



LHDの目標



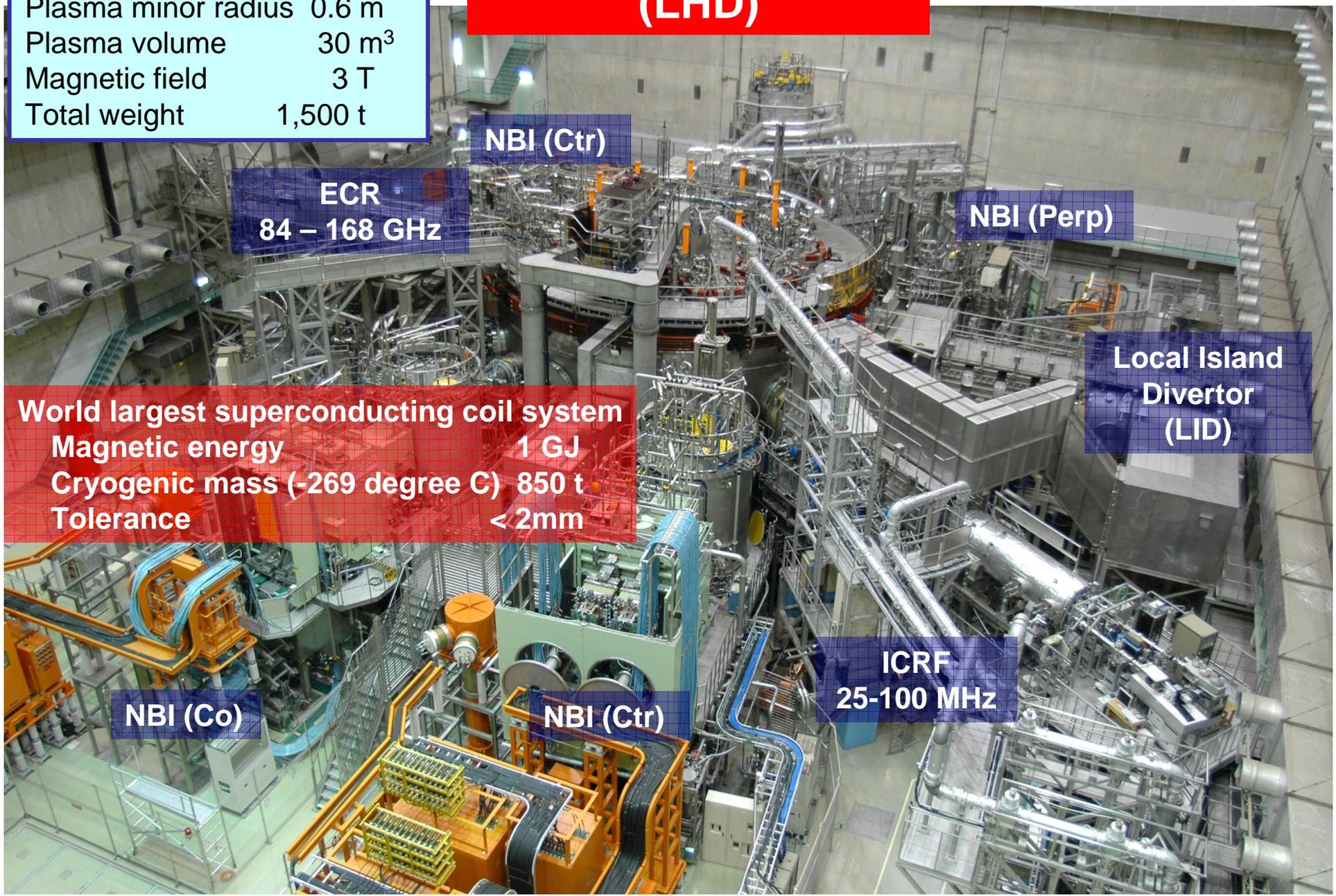
外部コイルで安定した閉じ込め磁場を形成→将来の安定した核融合炉の定常運転に優れる。

LHDの目標は

1. ヘリカル核融合炉の科学的、工学的実証
 2. ヘリオトロンタイプのとじこめプラズマの物理の解明。将来のヘリカル炉設計のための知識の集積
 3. トロイダルプラズマの閉じ込め物理の総合的理解(トカマクとの比較も重要)
- 超伝導マグネット : ~ 3T → 150 shots/日 (3分毎に放電可能。コイルの冷却を待つ必要ない。)
 - 加熱 :
 - NBI 15 MW (接線入射: 180 keV, 垂直入射: 40 keV)
 - ICH 2.7 MW (2 MW / CW) 25-100MHz
 - ECH 2 MW (0.2 MW / CW) 82.7、84GHz&168GHz
 - 磁場構造がダイバータ構造を持つ。

External diameter 13.5 m
Plasma major radius 3.9 m
Plasma minor radius 0.6 m
Plasma volume 30 m³
Magnetic field 3 T
Total weight 1,500 t

Large Helical Device (LHD)



NBI (Ctr)

ECR
84 – 168 GHz

NBI (Perp)

Local Island Divertor (LID)

World largest superconducting coil system
Magnetic energy 1 GJ
Cryogenic mass (-269 degree C) 850 t
Tolerance < 2mm

NBI (Co)

NBI (Ctr)

ICRF
25-100 MHz



これまでの実験結果のまとめと目標値

達成値 (*印を今回報告) [最終目標] H18年度達成は赤で表示 [H17年度は緑]

イオン温度

中心イオン温度 13.5keV [10keV]
密度 $0.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ (アルゴンガス) [$2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$]
水素ガス: 中心温度5keV $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$
[H17: 2.5keV]

電子温度

中心電子温度10keV [10keV]
密度 $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ [$2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$]

*体積平均ベータ値

5.0% (磁場 0.425T)
[H17: 4.5%] [$\geq 5\%$ (磁場 1~2T)]

*密度

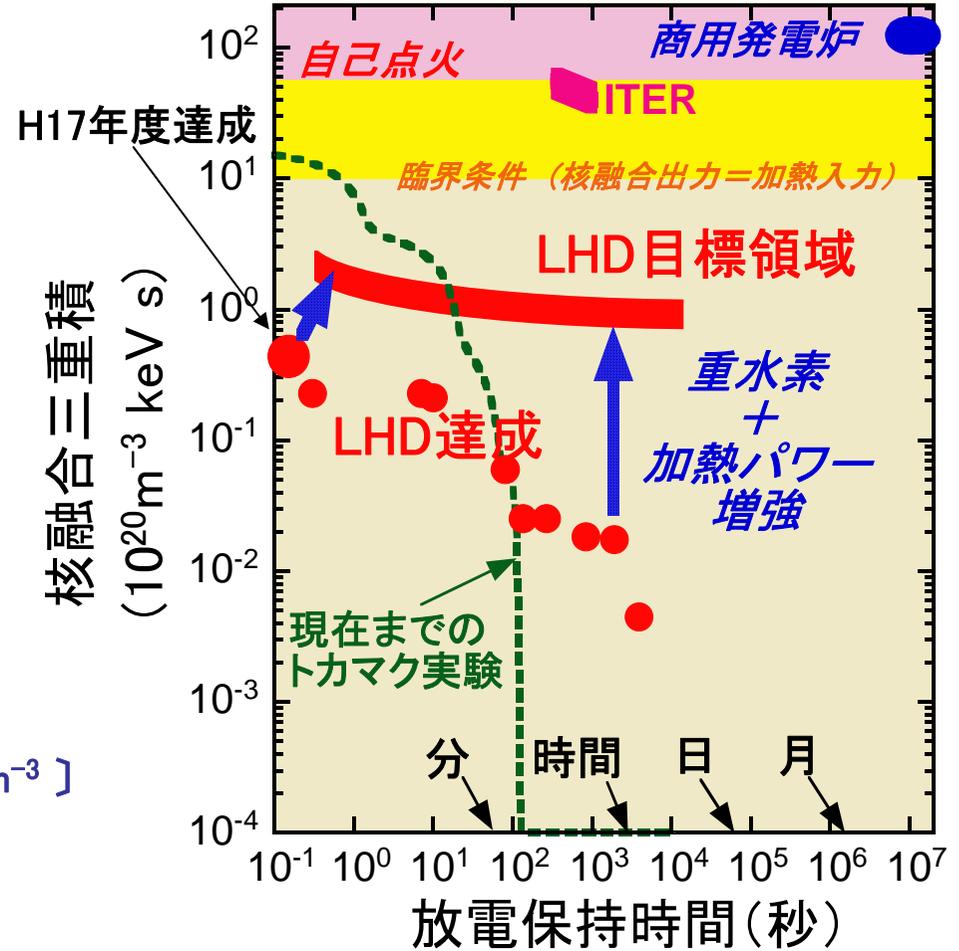
中心密度 $100 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ (温度 0.4keV) [$40 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$]
[H17: $50 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$]

蓄積エネルギー

1.44MJ [4MJ]
[H17: 1.37MJ 137万ジュール]

*定常運転 [1時間 (3,000kW)]

31分45秒 (700 kW) 入射エネルギー1.3GJ
54分28秒 (500 kW) 入射エネルギー1.6GJ



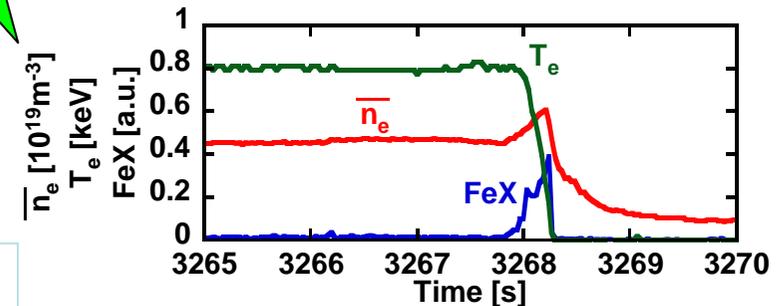
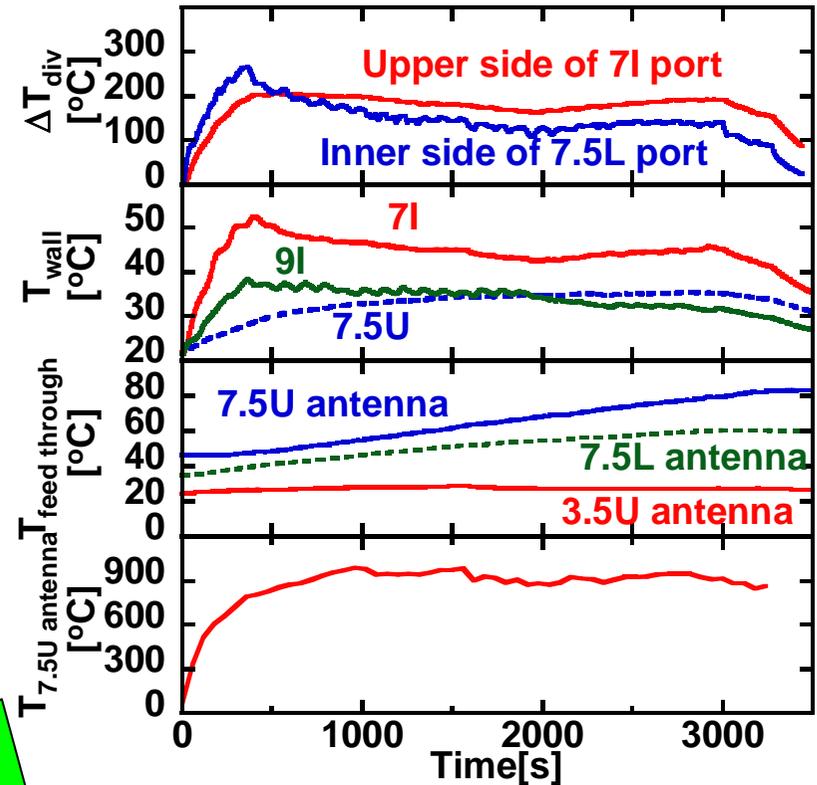
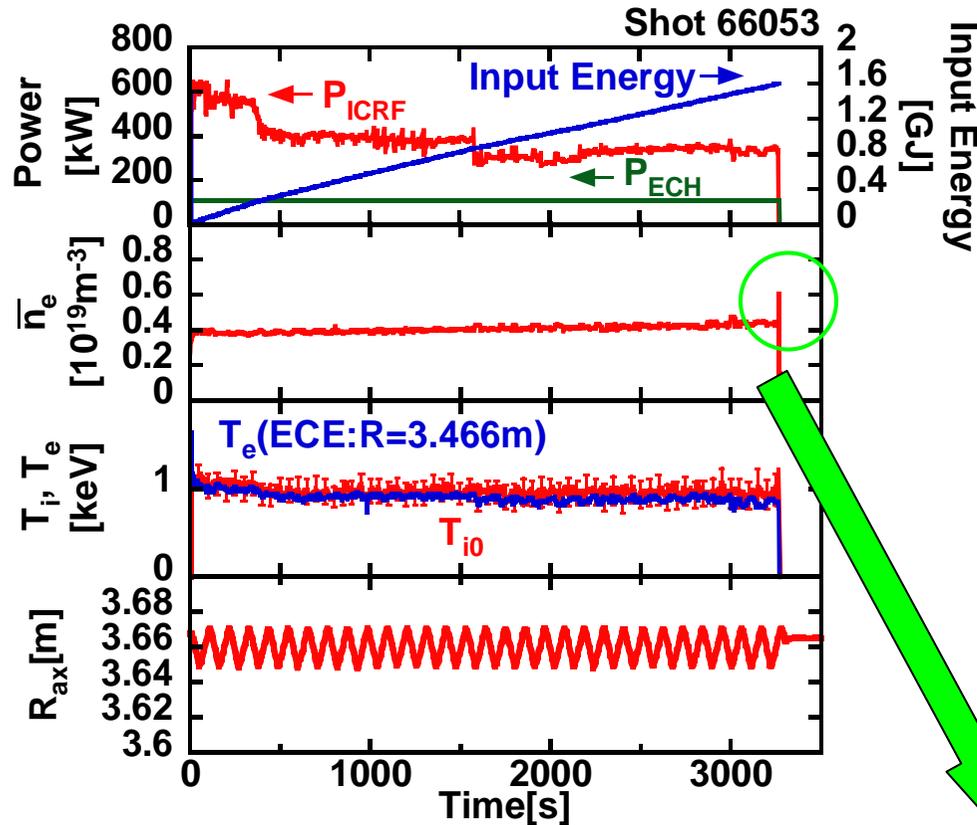
核融合臨界条件

中心イオン温度 10keV
密度 $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$
エネルギー閉じ込め時間 1秒
 β 値5%

独国マックスプランク研究所W7-X計画の10年先を行く



ICRF+ECHによる長時間放電(最大入射エネルギー)



・磁気軸を最適な位置に置き、スイープさせることでダイバータ板への熱負荷を分散させた。

・反射ICRFパワーを自動チューニングにより抑えた。

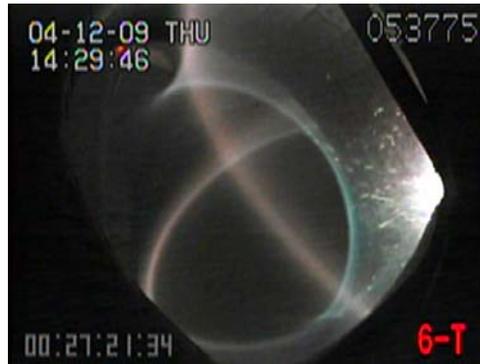
・プラズマ持続時間 **54分28秒**、入射エネルギー **1.6GJ**の達成

・平均パワー: 377kW(ICRF) + 110kW(EC)

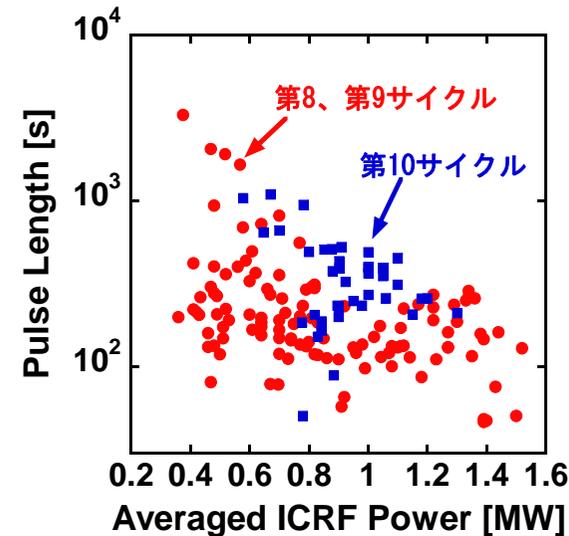
・ただし、突然の密度上昇によりプラズマが崩壊した。

現在の問題点

鉄の混入によりプラズマが崩壊することが最大の問題点



プラズマ崩壊時のスパーク。この場合トラス内側から発生している。スパークが鉄混入の原因と考えられる。スパークの起こる場所は特定されていない（ダイバータ付近か？）

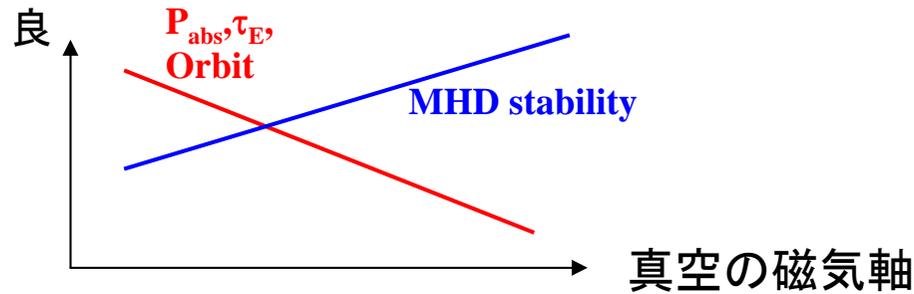


ICRF加熱パワーとプラズマ維持時間の関係。パワーが大きいほどパルス幅が短くなる傾向がある。

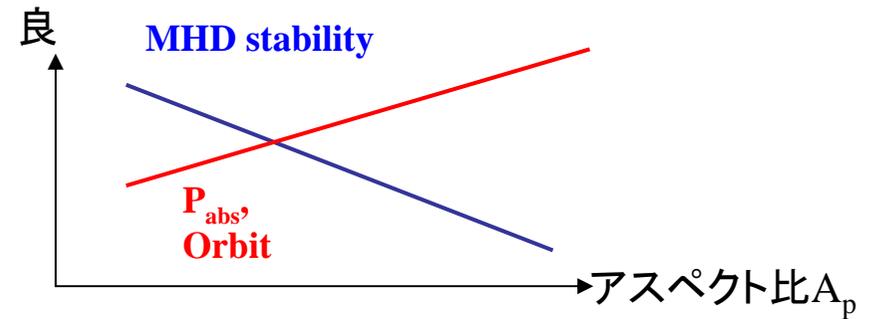
今後の予定

- ・ジャイロトロンを1台増設し定常ECHのパワーを増強する。
(2007年度、100kW→300kW)
- ・現在4本のICRFアンテナが使用可能であるが6本による定常運転を行う。
(2008年度)
→ICRF加熱によるトロイダル方向に偏ったダイバータ板への熱負荷を分散できる。
- ・スパークを抑える運転方法を試行錯誤で探していく。

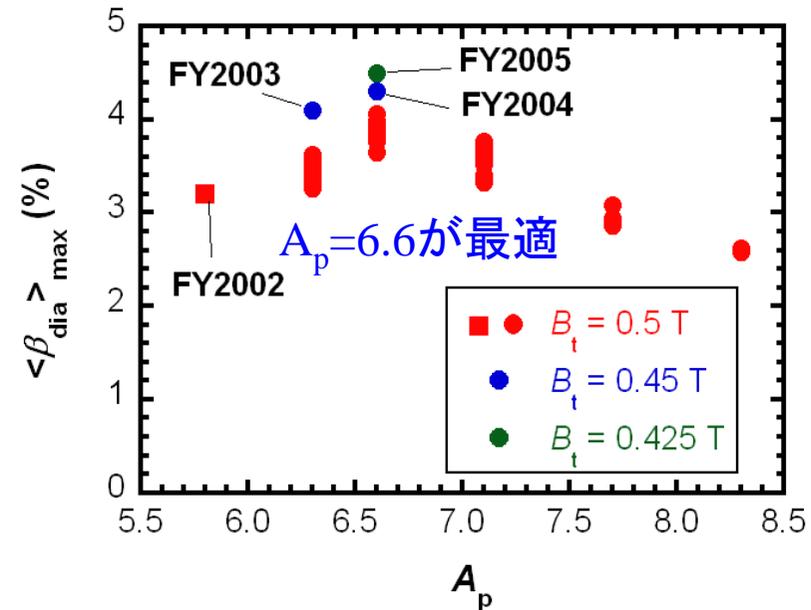
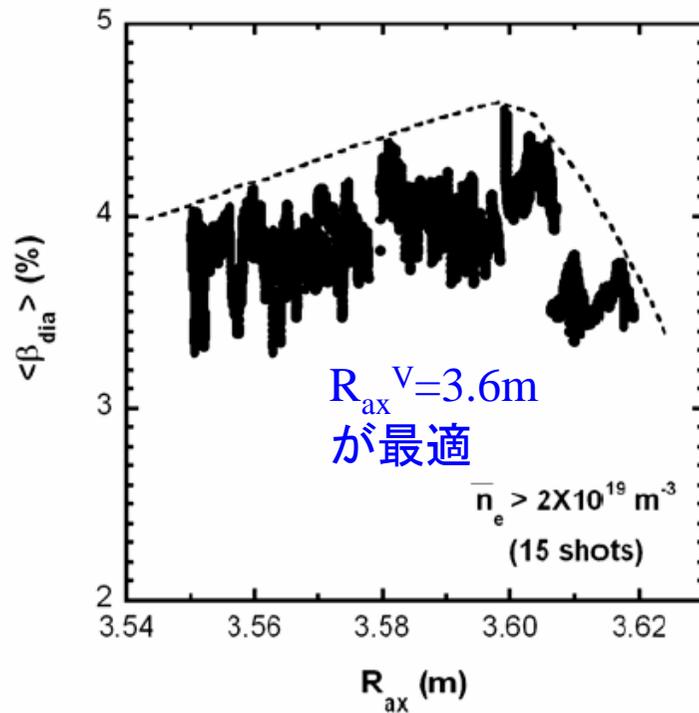
NBIパワーの増強、真空磁気軸とアスペクト比(の最適化により高速イオンの粒子軌道を最適化すると同時にMHDの安定性を両立させて高 β (~5%)を達成した。



ヘリカル補足粒子軌道の最適化とMHD安定性の両立



最適磁気軸での磁気軸シフトの低減(シフト量 $\propto 1/A_p$)とMHD安定性の両立



At $R_{ax}^V=3.6m$

高ベータ領域拡大の歩み

$\langle \beta \rangle_{\max} (A_p, B_0)$

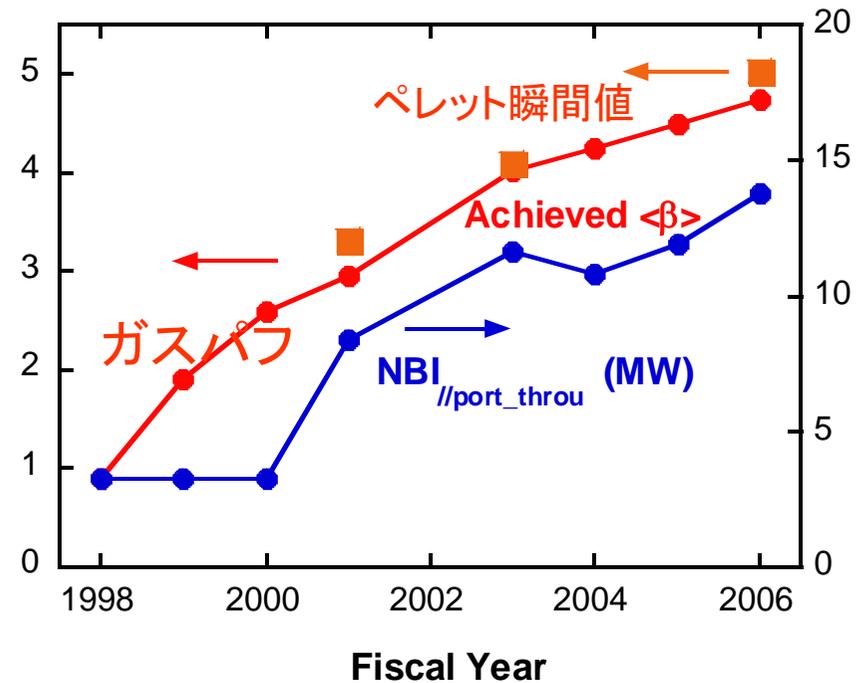
FY2002 (R_{ax} の最適化 : 3.2 % (5.8, 0.5 T)
 B_0 の減少)

FY2003 (A_p の減少) : 4.1 % (6.2, 0.5 T)

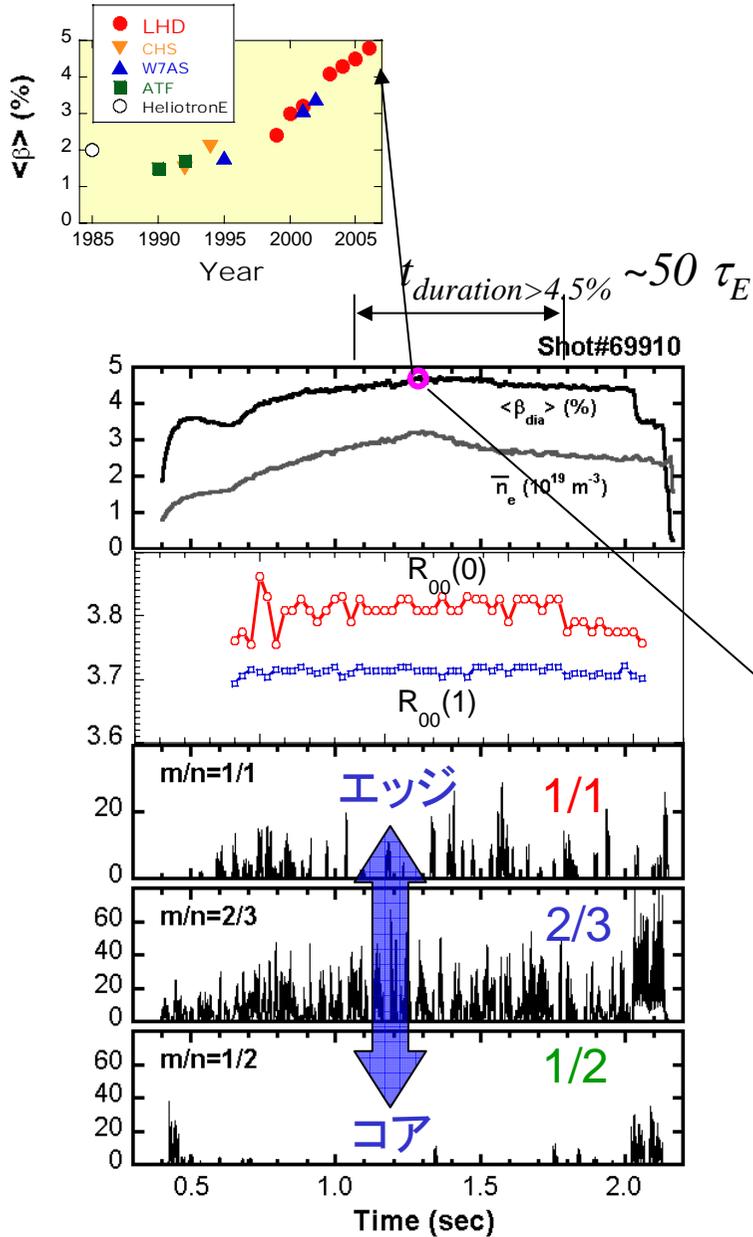
FY2004 (A_p の最適化) : 4.3 % (6.6, 0.45T)

FY2005 (B_0 の最適化) : 4.5 % (6.6, 0.425 T)

FY2006 (アイスペレット: **5.0 % (瞬間値)**
 NBパワーの増強) : [4.8 % (準定常)]

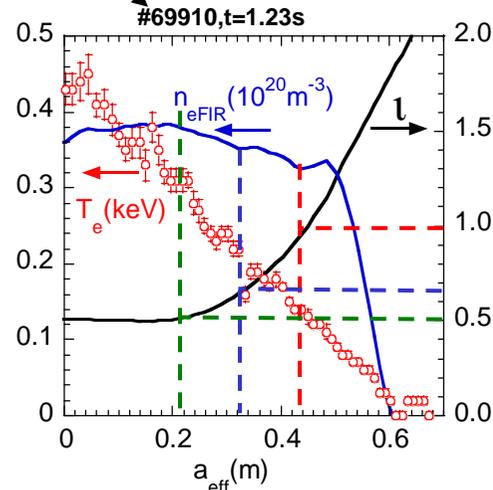


$\langle\beta\rangle=4.8\%$ プラズマの放電波形



$t_{duration>90\%} \sim 100 \tau_E$

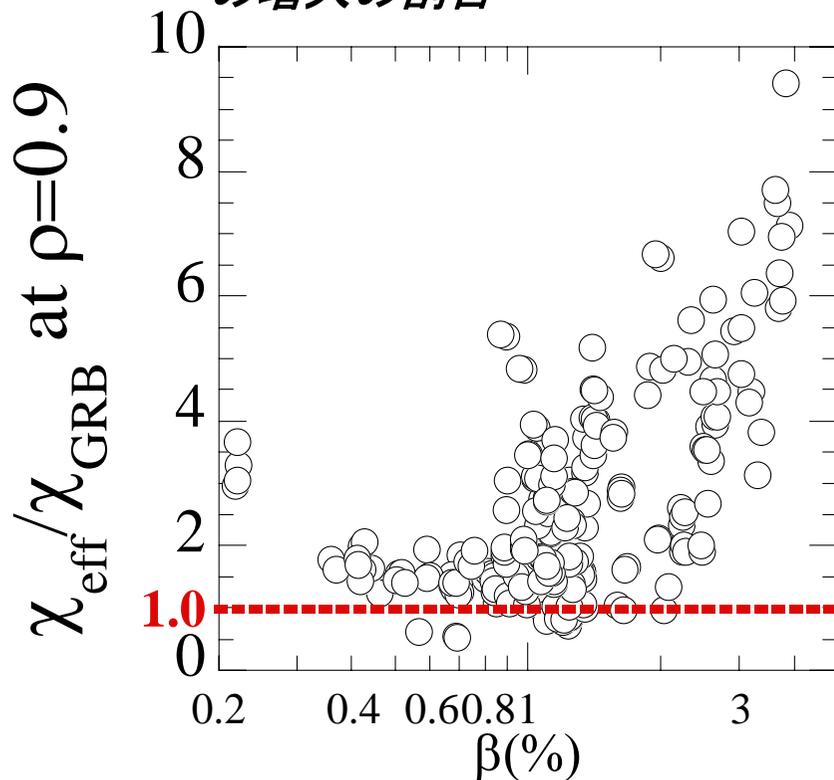
- # 破壊的な(disruptive)現象なしに4.5%を超えるプラズマが長い時間維持されている
- # プラズマ小半径で規格化して1/4程度のそれほど大きくないシャフラノフシフトを観測
- # Low- n,m activities 磁気揺動特性
 - コア領域に共鳴するモードは観測されない
 - 周辺領域($\rho>0.9$)に共鳴するモード($m/n=2/3, 1/1$)のみが観測されており、ベータが高くなるとモードの発生は間欠的になる。



電子温度分布に平坦化や非対称な細かい構造は見られるが、巨視的閉じ込め性能に大きな影響を与えるような広い範囲に渡った電子温度分布の平坦化は観測されていない。

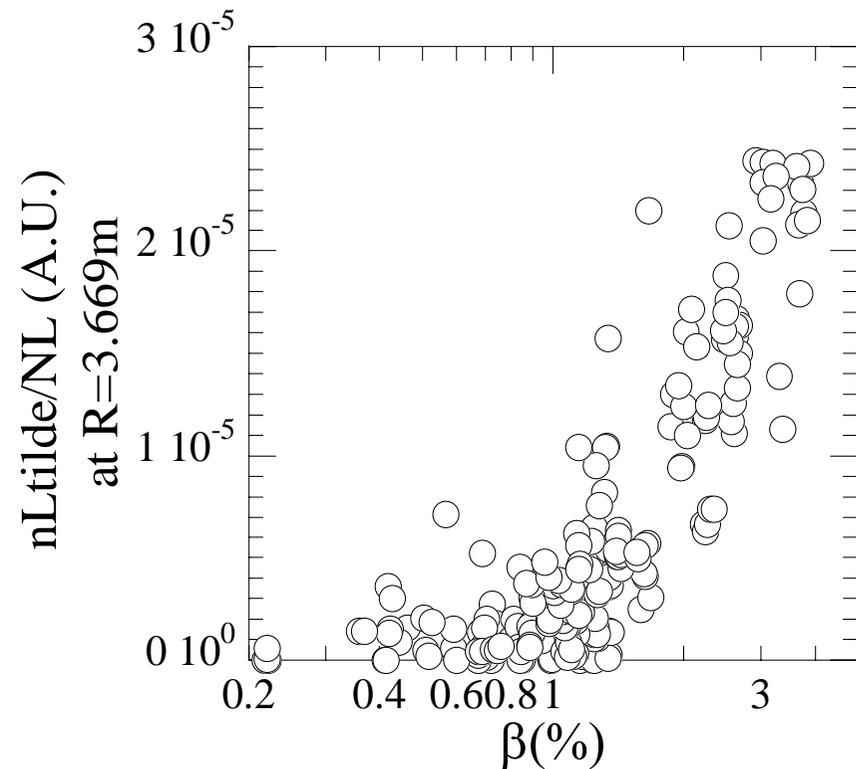
$\beta > 1\%$ で β の増加に伴いエネルギー閉じ込めが劣化。
高 β 領域での閉じ込め改善がの課題

スケーリング(ジャイロボーム的)で予測される χ_{eff} からの増大の割合



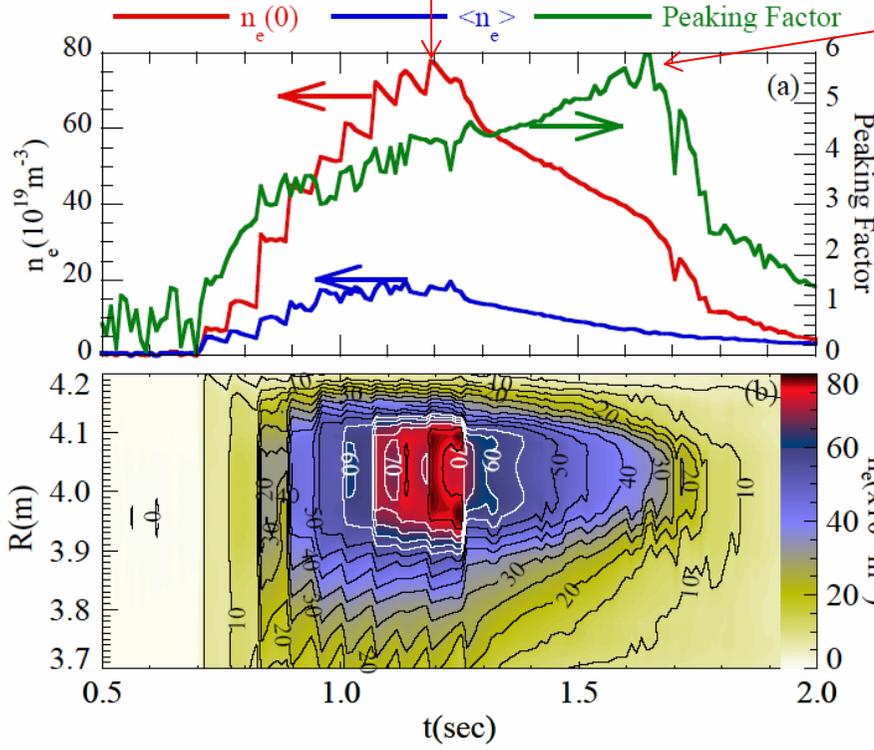
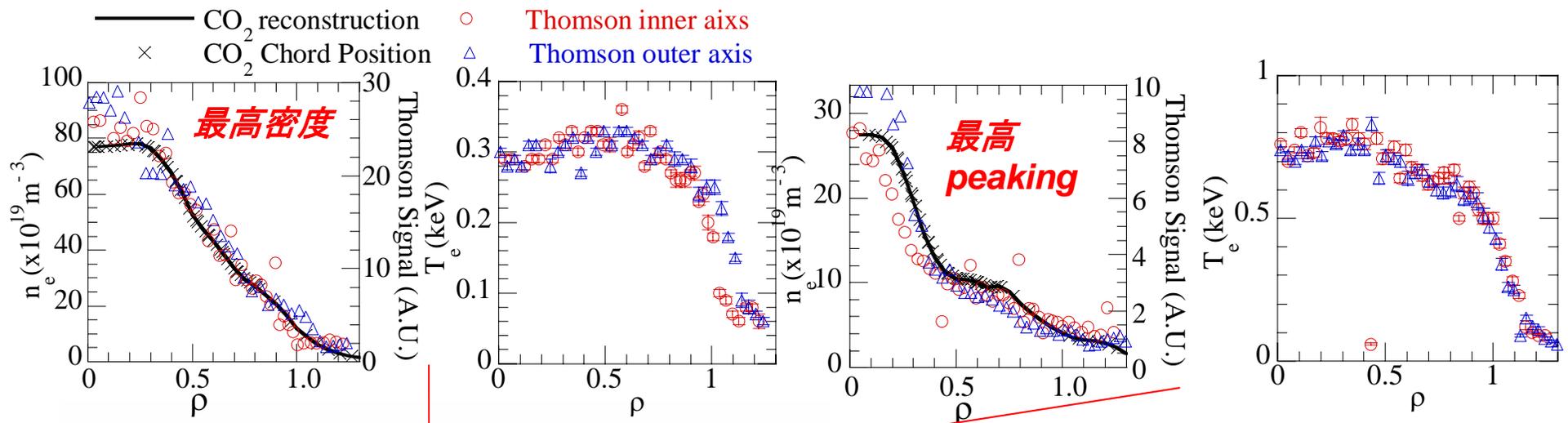
低 β と同じ閉じ込め特性を保つなら $\chi_{\text{eff}}/\chi_{\text{GRB}}=1$ のはず。

干渉計で計測した揺動レベルの変化



波長 $> \sim 30\text{mm}$ の揺動
Resistive interchange turbulenceか？

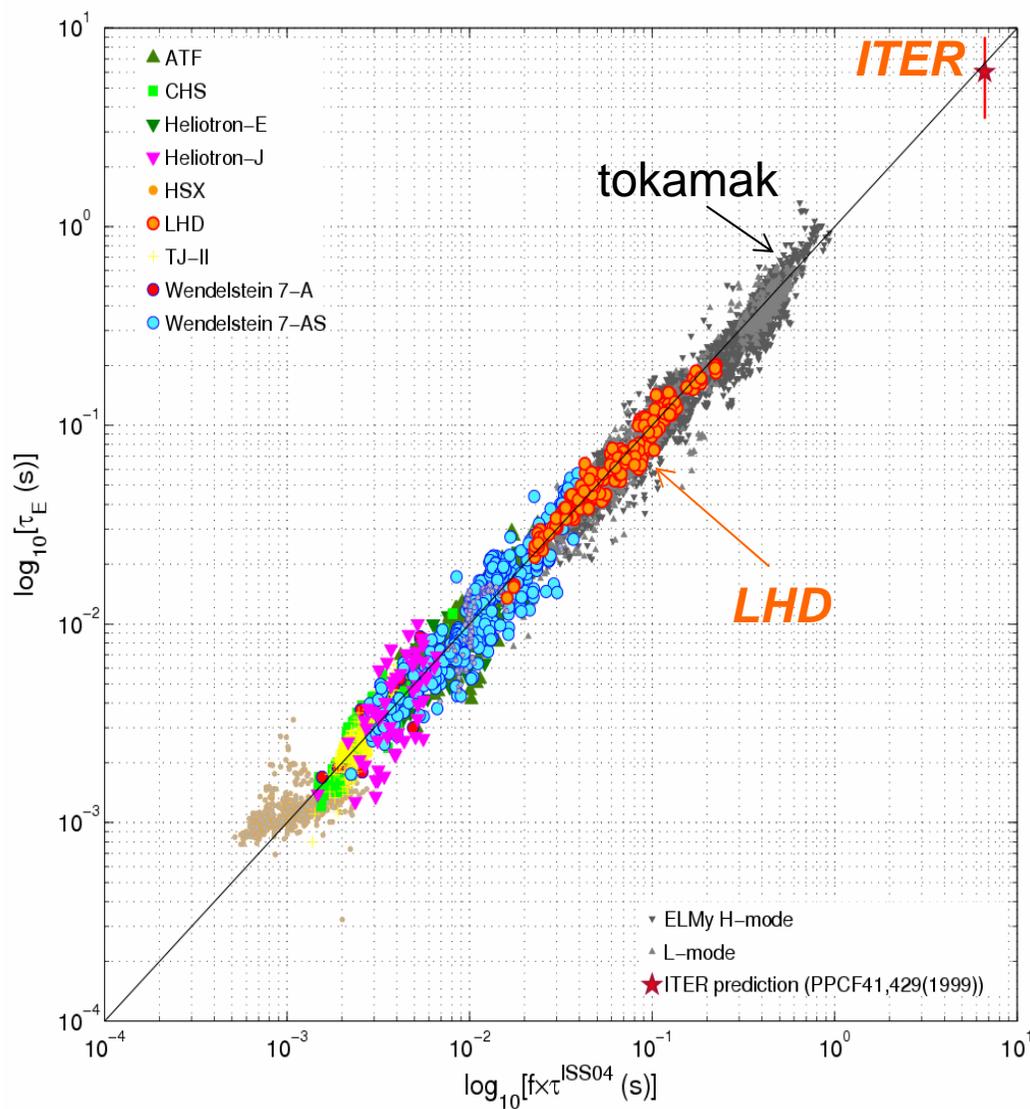
ペレット入射による高密度放電の達成



高密度核融合 ($\sim 5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, $\sim 7 \text{keV}$)の可能性を追求。

1. 高温でPeakingを維持できるか？
2. 高温領域での新古典輸送の増大 (現在は新古典輸送の大きい配位で観測)

トカマクのデータもヘリカル/ステラレーターのスケージングに沿う。



トカマクもヘリカルもジャイロボーム的(正確には弱いジャイロボーム)な拡散でありイオンのラーモア半径程度の乱流が拡散過程を決める。

$$D(\text{拡散係数}) \propto \frac{\rho_i}{a} \frac{T}{B} \approx \rho^* D_{Bohm}$$

a; 小半径, ρ_i ; イオンラーモア半径、
T; プラズマ温度、B; 磁場

乱流理論とのアナロジー

乱流の拡散係数

$D \propto l_c$ (乱流の相関距離) $\times V_D$ (乱流流体の速度)

$V_D \sim$ プラズマ反磁性ドリフト速度 ($\sim T/aB$) とすると

ボーム拡散は $l_c = a, D_B \propto T/B$

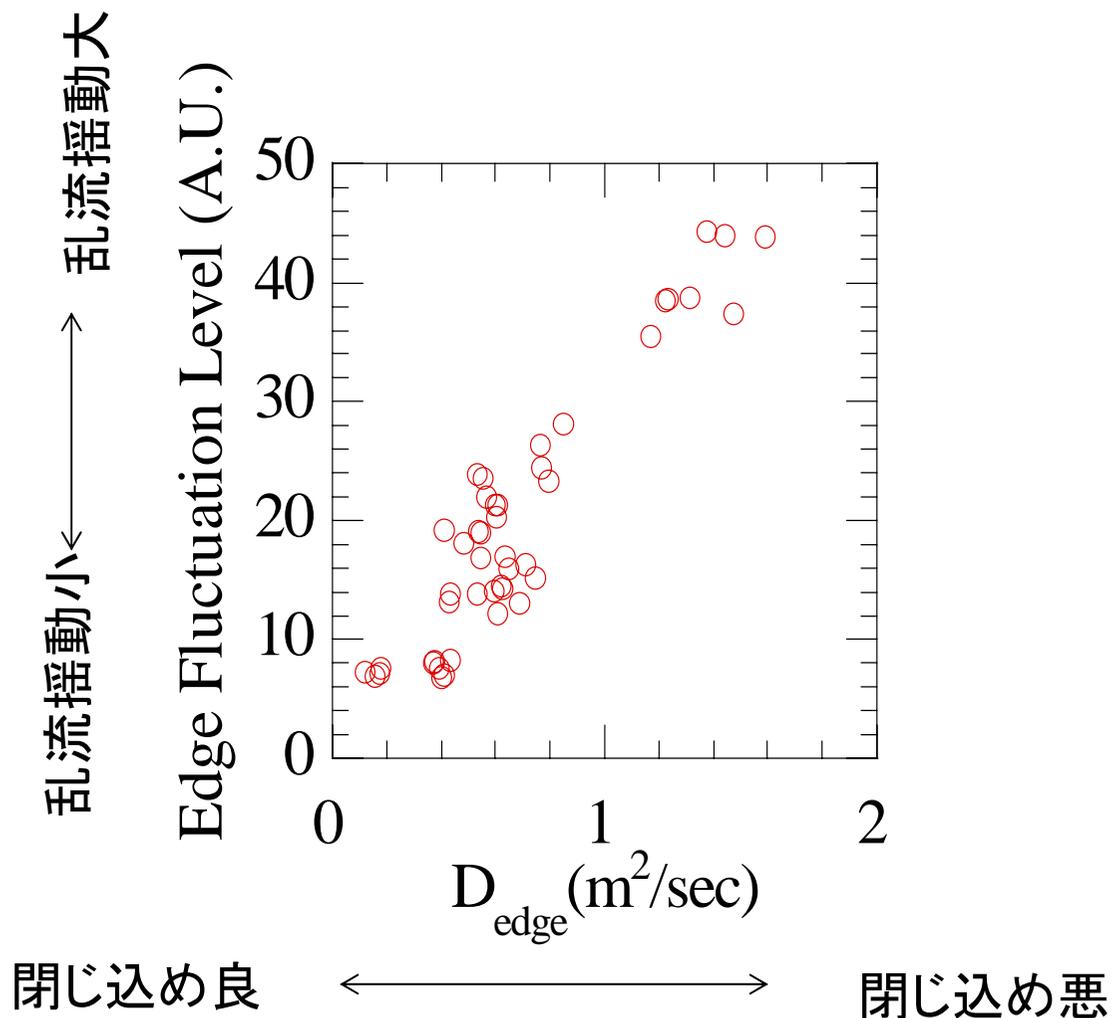
ジャイロボーム拡散は

$$l_c = \rho_i, D_{GB} \propto \rho_i T/aB = \rho^* D_B \propto T^{1.5}/B^2$$

$$\tau_E^{ISS04} = 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{0.54} B^{0.84} t_{2/3}^{0.41}$$

$$\tau_E^{ISS04} \propto \tau_{Bohm} \rho^{*-0.70} \beta^{-0.19} v_b^{*0.00} t_{2/3}^{1.06} \epsilon^{-0.07}$$

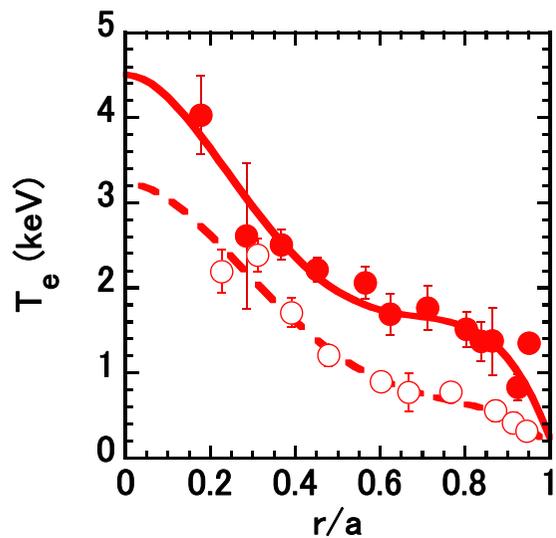
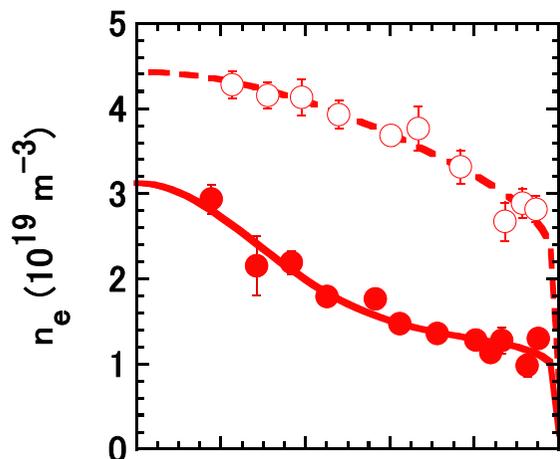
LHDではイオンのラーモア半径程度 ($k_{\text{perp}}\rho_i \sim 0.5$) の乱流が周辺の粒子拡散係数に比例して大きくなることを観測



閉じ込め劣化に伴う乱流揺動の増加はトカマクでも広く観測されえている。

トカマクと異なる観測結果→密度分布の違い。トカマクは常にpeaking,ヘリカルは密度分布はhollowからpeakingまで大きく変化。

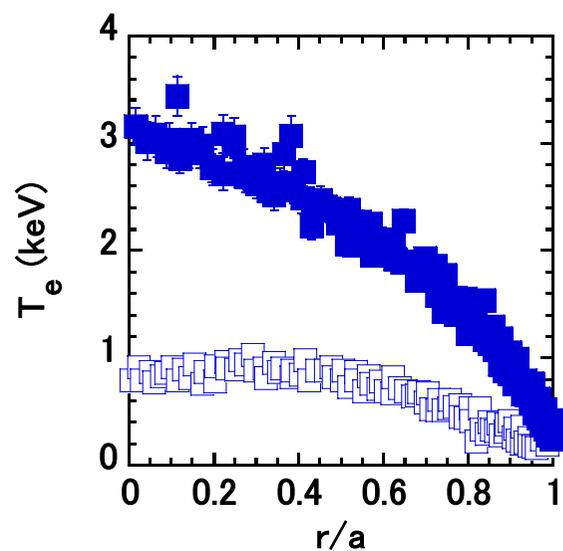
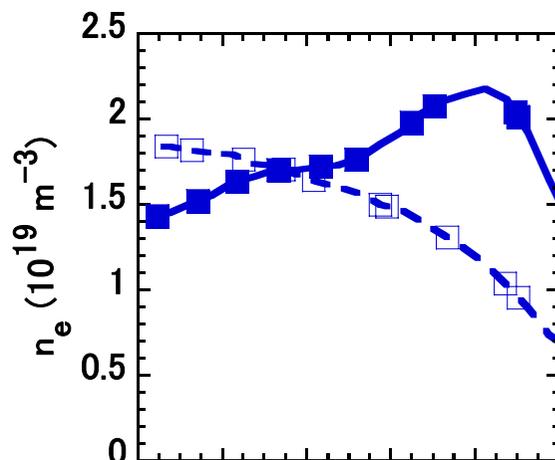
JT60U Elmy H mode



$P_{\text{NBI}}=8-10\text{MW}$ での密度スキャン

LHD Rax=3.6m

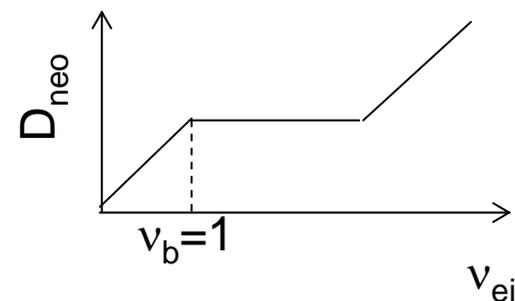
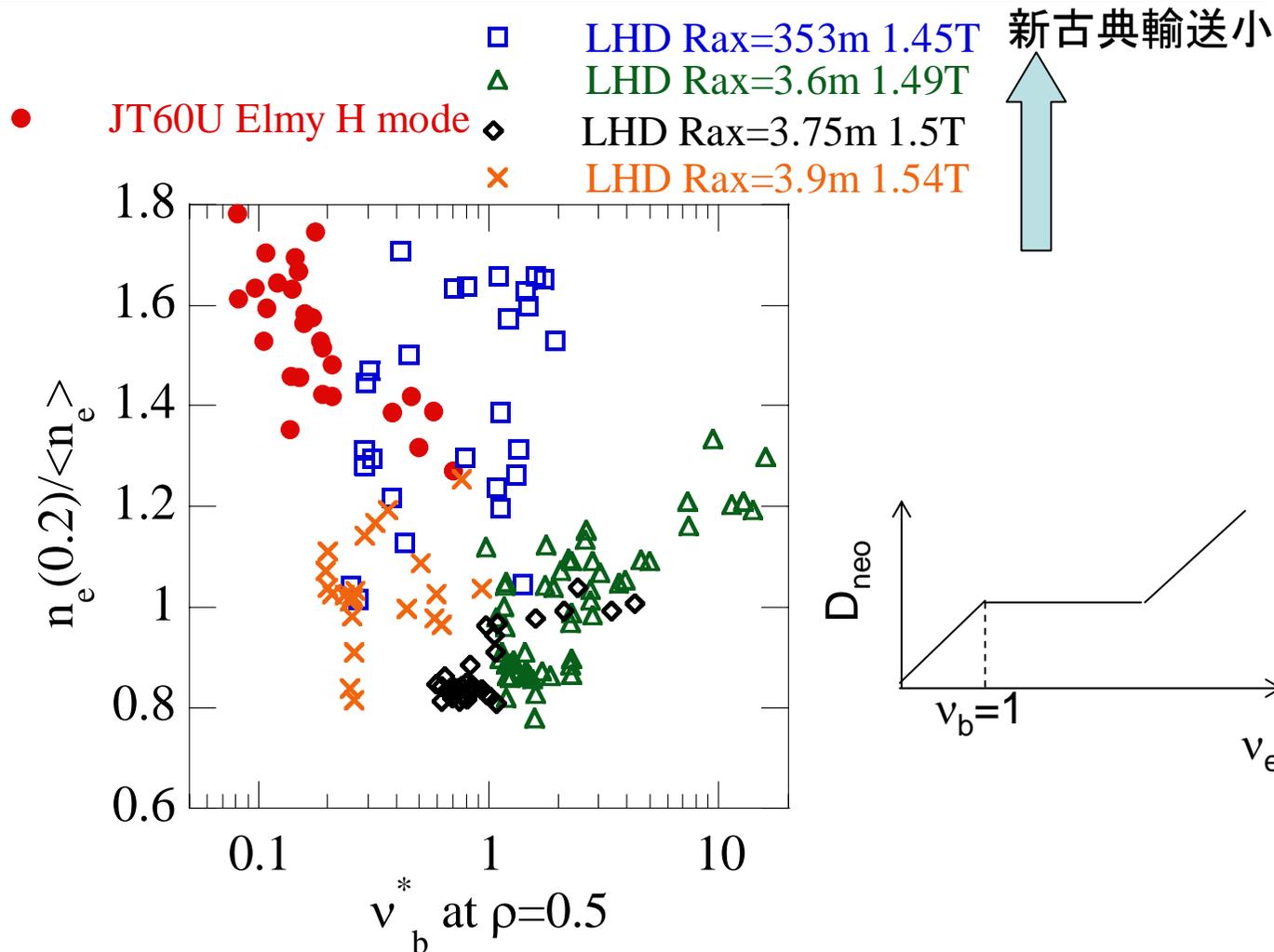
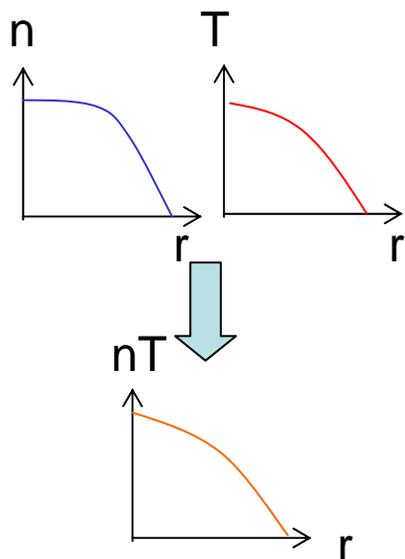
■ $P_{\text{NBI}}=8.5\text{MW}$ □ $P_{\text{NBI}}=1\text{MW}$



同程度線平均密度でのパワースキャン

JT60U Elmy H modeでは v_b^* に対して密度peaking factorは増加、一方でLHDでは磁場配位により依存性が異なる。

不純物が蓄積しない限り核融合炉では核融合出力を上げるためにピーキングした分布が望ましい。



$v_b^* = v_{ei} / (\epsilon_t^{3/2} v_T / qR) = 1$; トカマクのバナナ領域とプラトー領域の境界

密度分布の形状は粒子ソースの無視できる領域で密度勾配による拡散と対流のバランスにより決まる。

粒子バランスの式

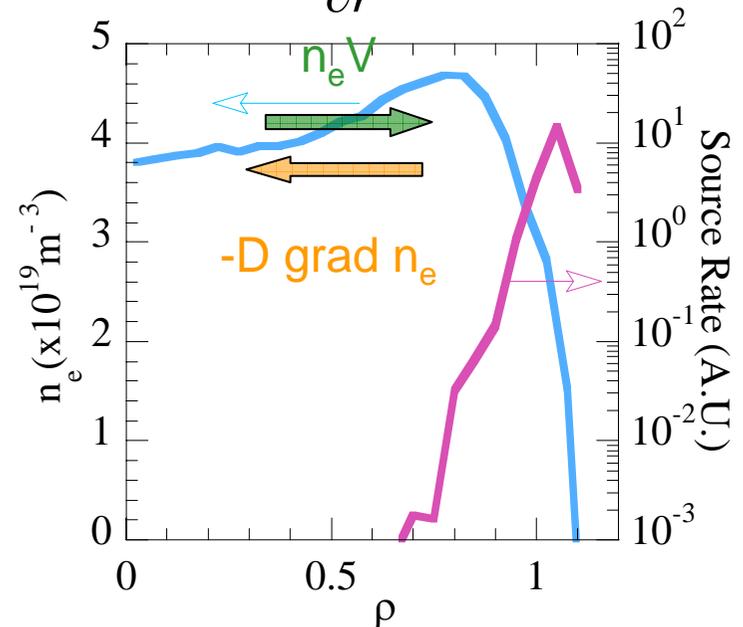
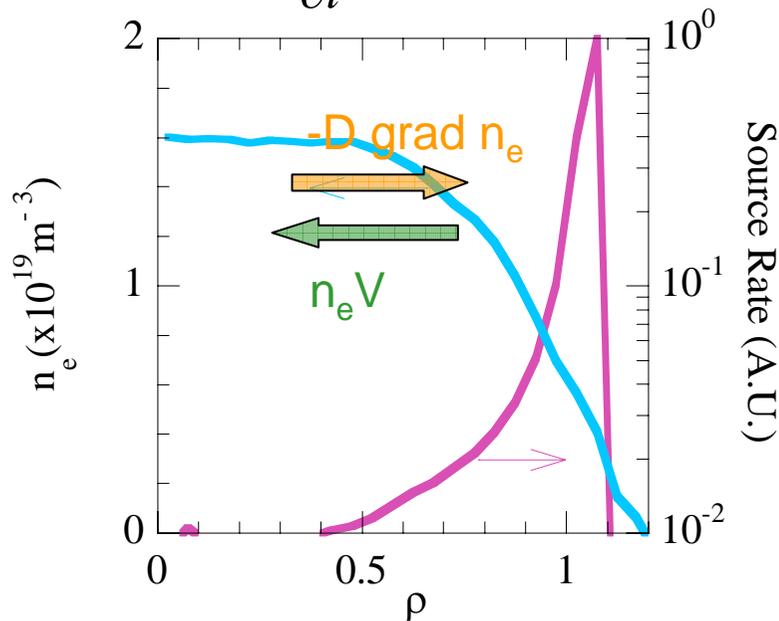
$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma + S = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r\Gamma + S \quad (1)$$

n ; electron density, Γ ; particle flux, S ; particle source rate

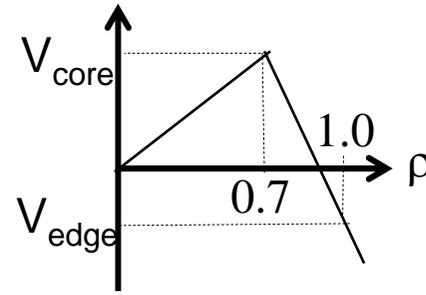
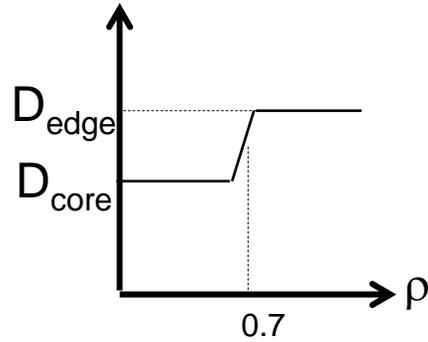
$$\Gamma = -D \frac{\partial n}{\partial r} + Vn, \quad (2)$$

D ; diffusion coefficient, V ; convection velocity

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 \text{ (定常状態)}, S \sim 0 \text{ (コア領域)}, \Gamma \sim 0 \Rightarrow D \frac{\partial n}{\partial r} = nV$$



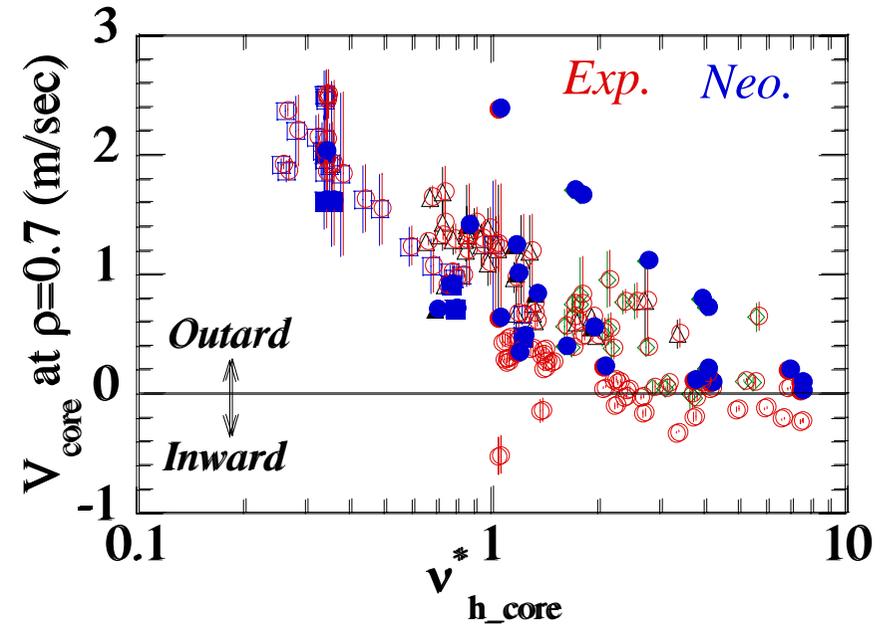
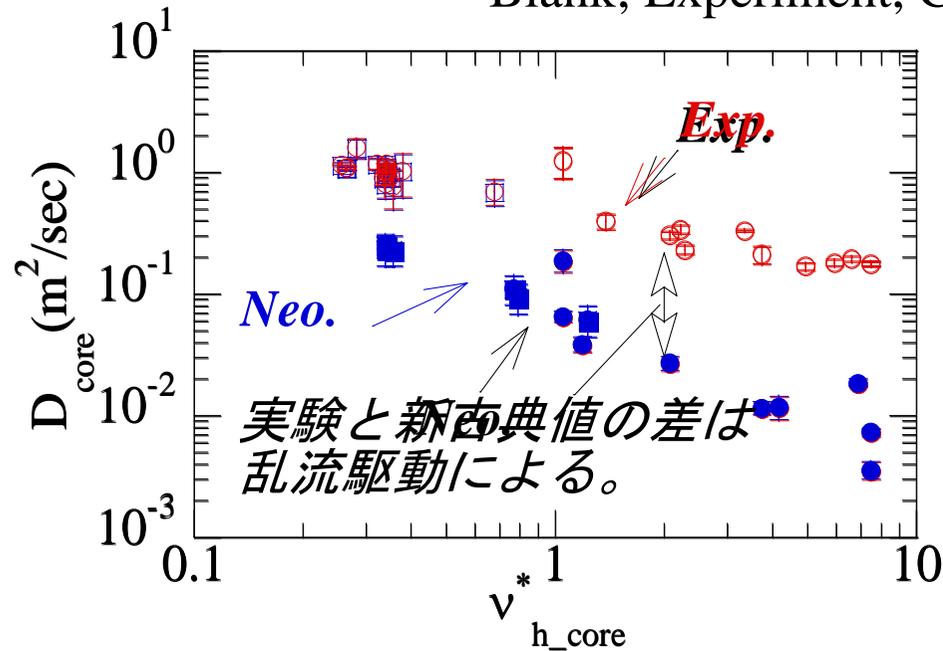
密度変調実験により求めた粒子輸送係数はコア領域でDは異常輸送値、Hollowな分布でVは新古典値と同程度。



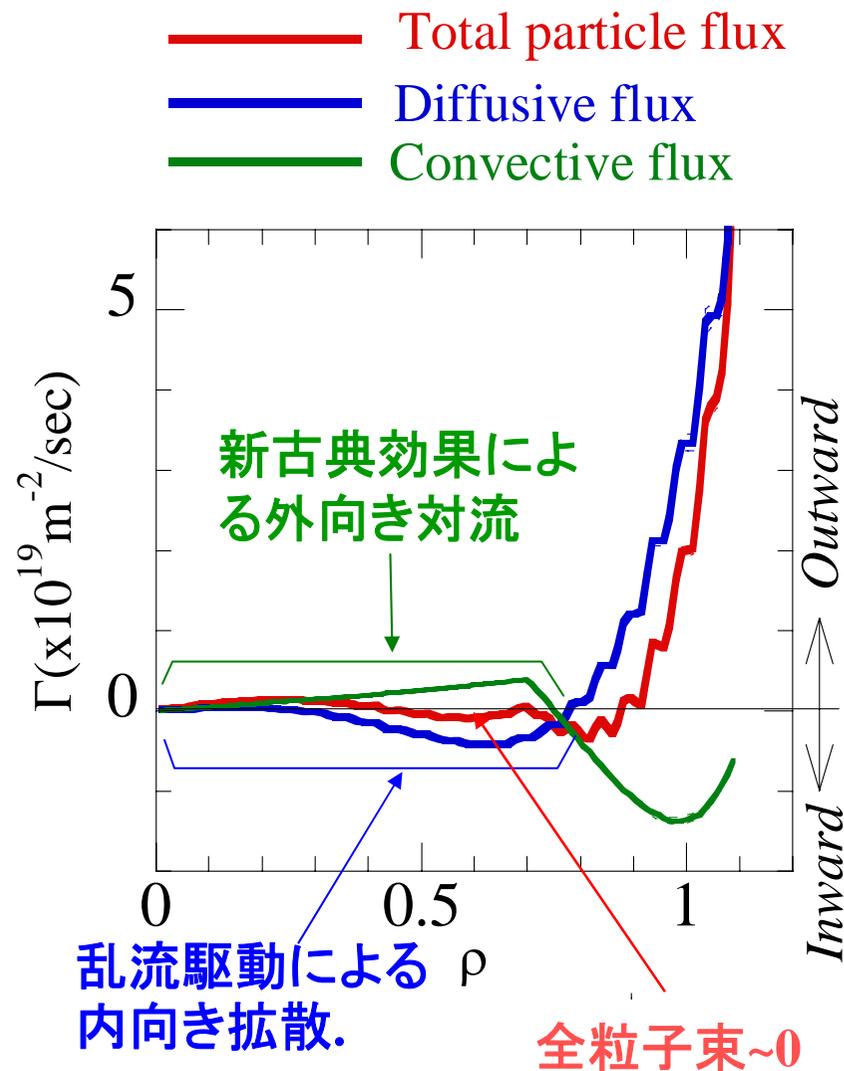
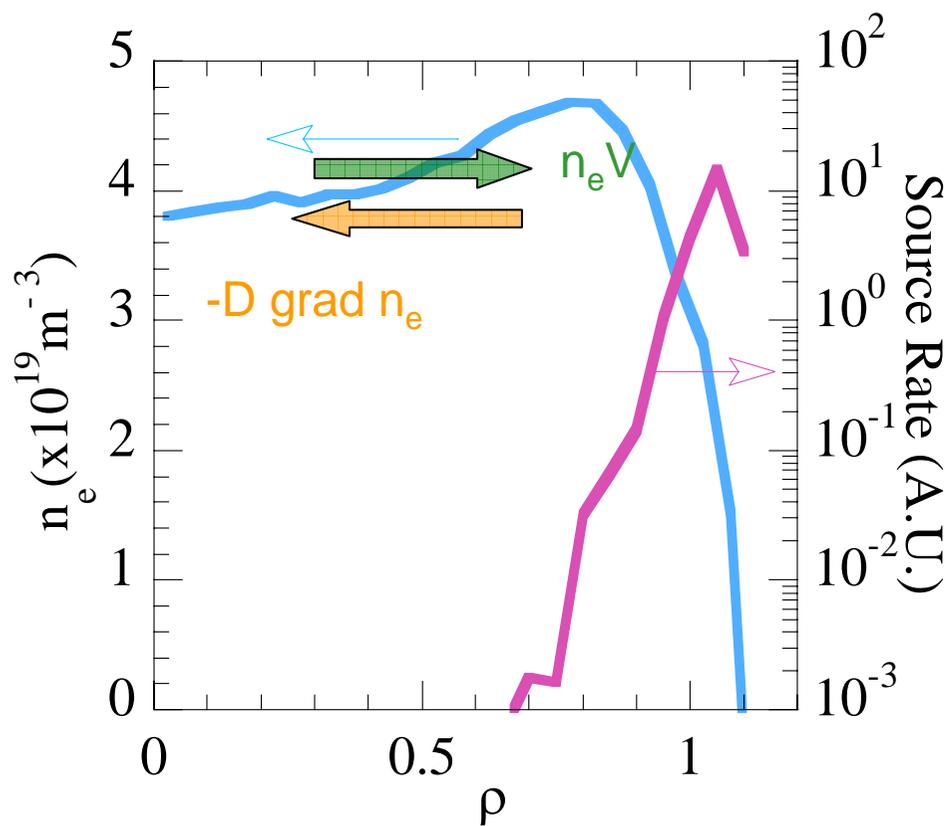
—○— $R_{\text{ax}}=3.6n, B_t=2.75T$ —◇— $R_{\text{ax}}=3.6n, B_t=1.49T$

—△— $R_{\text{ax}}=3.75n, B_t=1.5T$ —□— $R_{\text{ax}}=3.9n, B_t=1.54T$

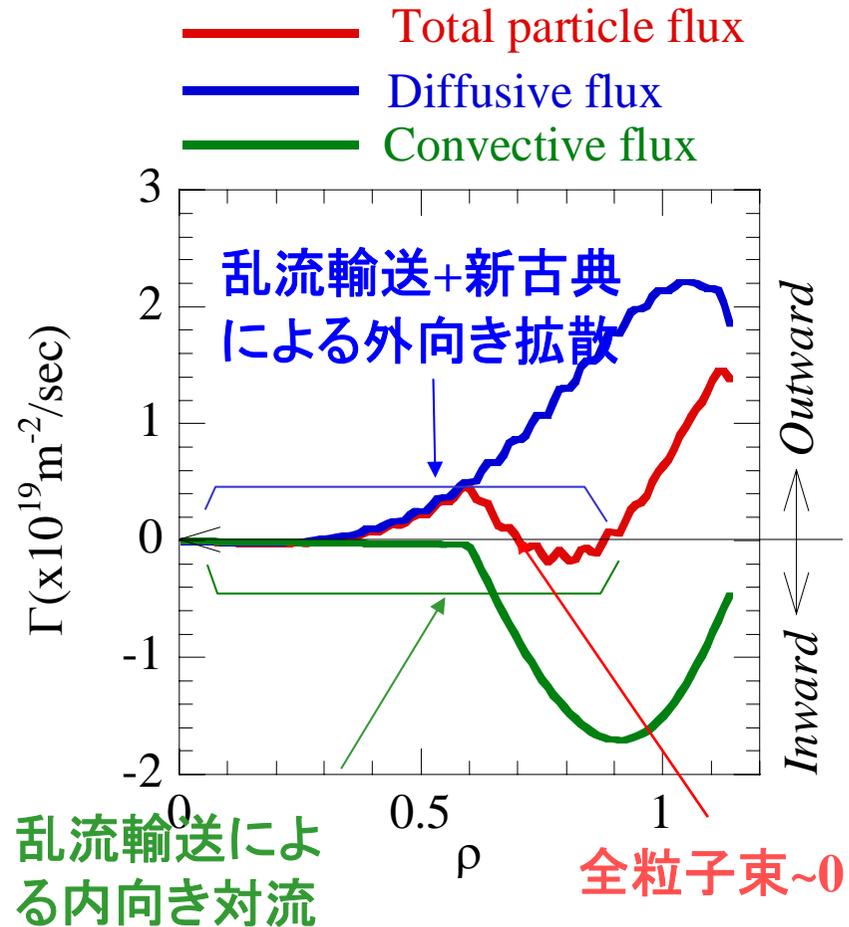
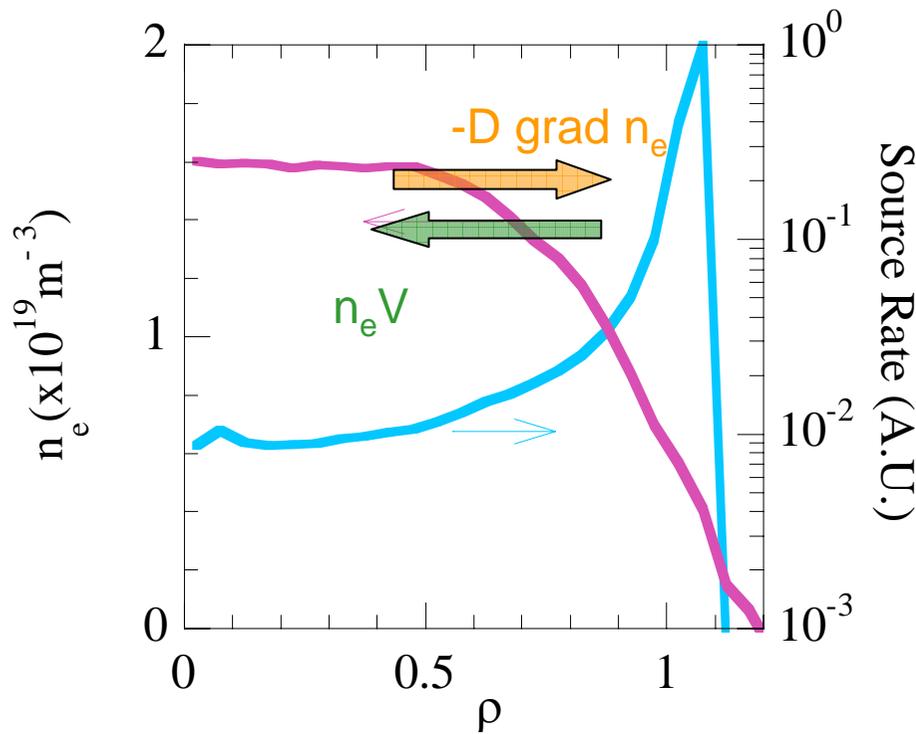
Blank; Experiment, Colored; Neoclassical



Hollow 密度分布の粒子flux分布はコアで外向き新古典対流と内向き異常拡散が釣り合う。

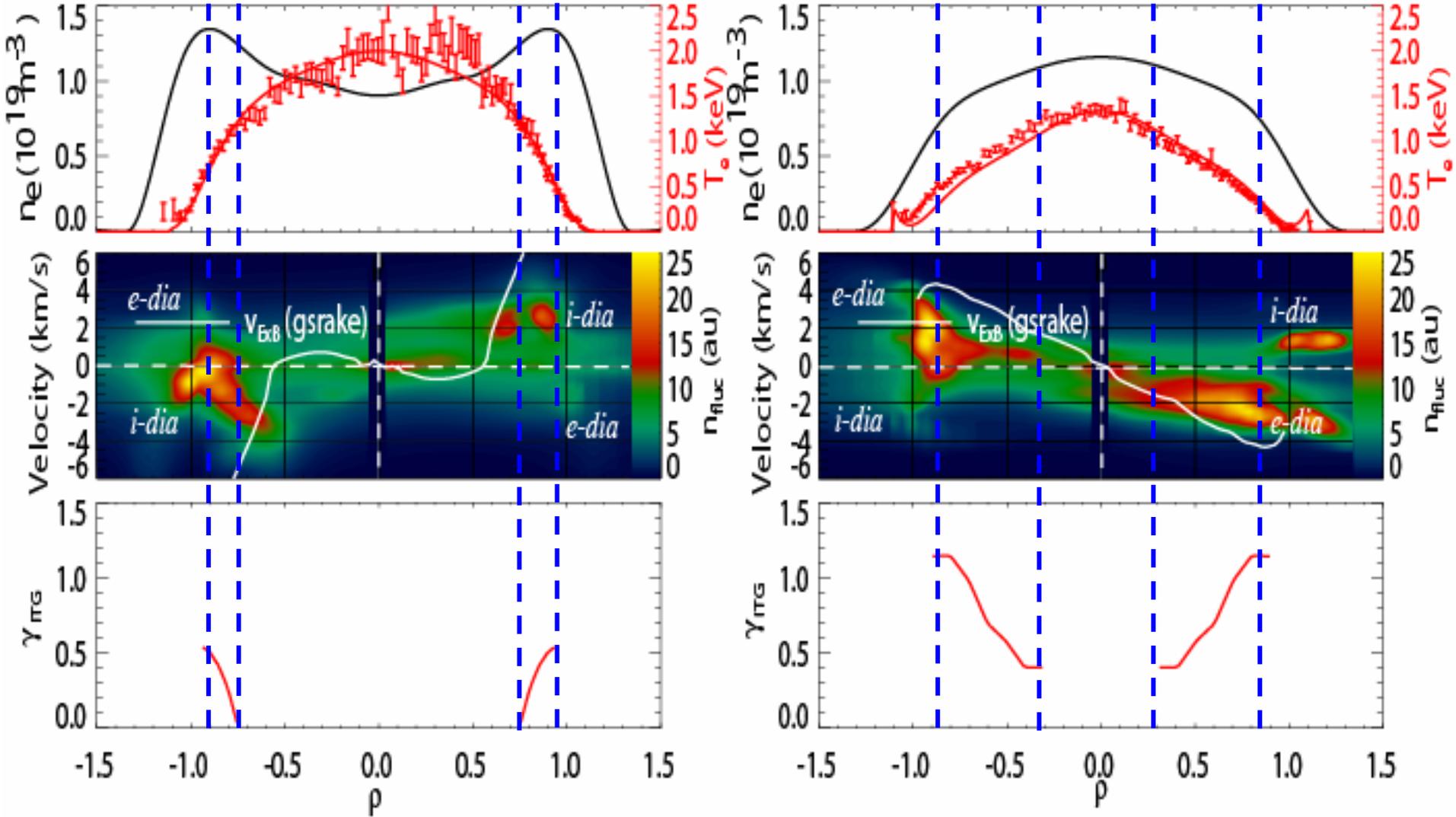


新古典は内向きピンチを予測しない。Peaking分布のコア領域で外向き(異常拡散+新古典)粒子束と内向き以上ピンチが釣り合う。



Peaking する場合はトカマクと同じ物理機構か？

ITG/TEM成長率が正のところには揺動が主要な成分が存在。



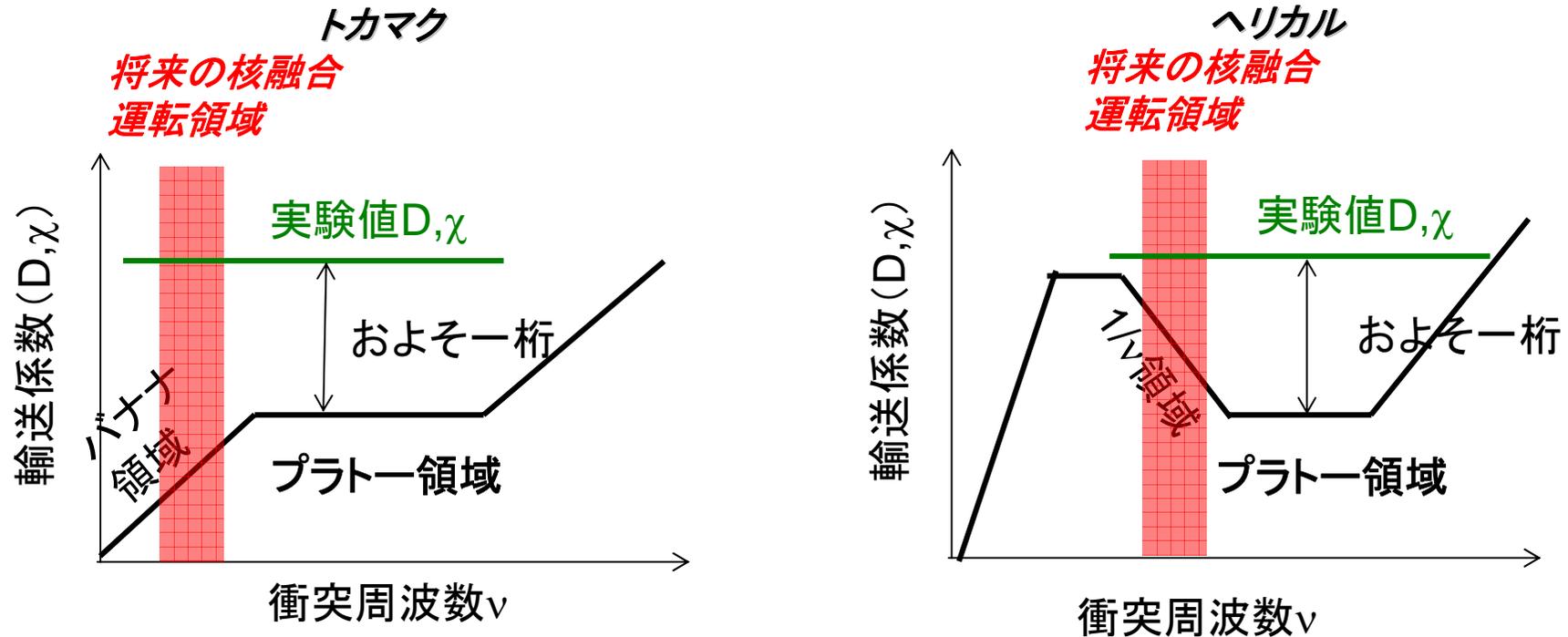
これらの乱流揺動による粒子束と新古典の粒子束(トカマクでは無視できるほど小)のバランスで密度分布の形状が決まる。

まとめ

1. LHDでは将来のヘリカル型核融合炉の実現を目指して研究が進められておりパラメータについて達成パラメータが($T_e, T_i, n_e, W_p, \beta$, プラズマ維持時間)着実に進展し、目標値に近づいている。
2. 核融合炉の運転を確実に外そうできる実験を進める必要がある。そのためには、加熱パワーの増強、重水素実験、および、閉じ込め、安定性についての物理の理解、また、粒子制御のための閉ダイバータの開発が必要である。
3. トカマクとヘリカルのスケーリングの ρ^* に対する依存性はほぼ同じであり、イオンのラーモア半径程度の波長の乱流に支配されている拡散現象はトカマクとヘリカルで共通していると考えられる。
4. 一方、密度分布形状は明確な違いがあり、これはヘリカル系で大きい新古典の対流によると考えられる。トカマクは乱流のみで密度分布が決まると考えられているがヘリカルは乱流輸送と新古典輸送のバランスで密度分布が決まる。
5. そのほか、磁気島の制御手法、エルゴディック層、磁気リップルの輸送に与える影響はトカマクとヘリカルで比較研究を進めることにより理解が深まることが期待できる。

トカマクとヘリカルの相違点のひとつは低衝突周波数領域での新古典輸送係数の増大。

新古典輸送では閉じ込め磁場中の粒子の衝突と軌道で拡散過程が決まる。



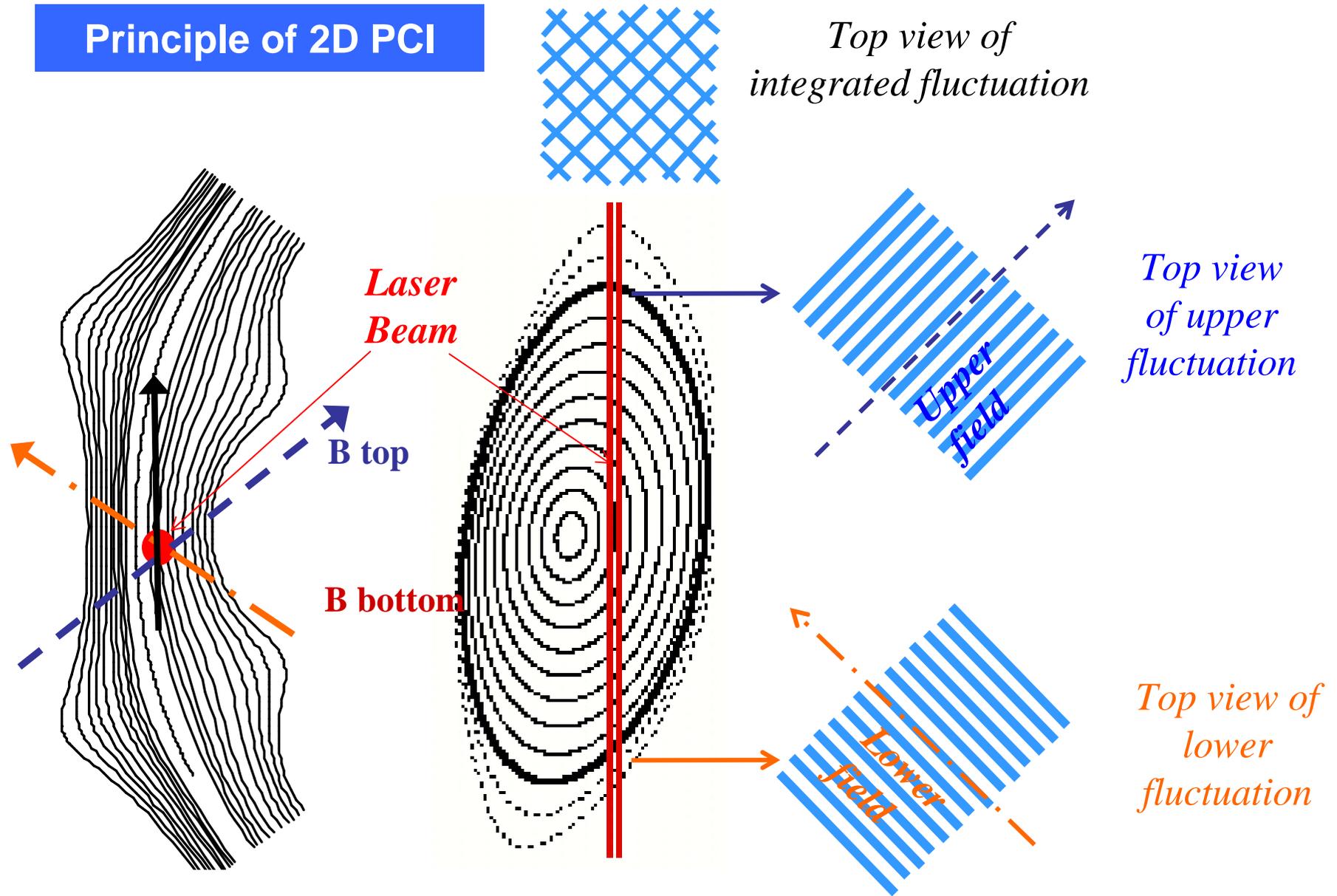
トカマクの改善モード (Reversed Shear mode) では乱流輸送を低減したことにより輸送係数が新古典輸送程度になったとの報告がある。

ヘリカルの $1/\nu$ 領域はヘリカル磁気リップルの存在による。

$1/\nu$ の輸送係数を低減するためには磁気リップルの小さい配位にするまたは正の強い電場形成することが有効。

最近のLHDの結果では粒子輸送については対流速度 (粒子束の非対角拡散項) が新古典程度であることがわかった。これがトカマクとヘリカルの密度分布の違いを引き起こす。

Principle of 2D PCI



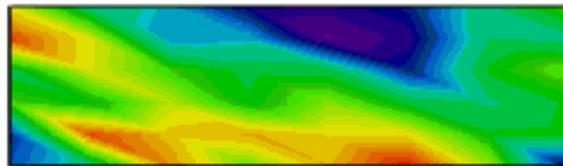
Propagation direction tells spatial points of fluctuation.

Movie of Fluctuation

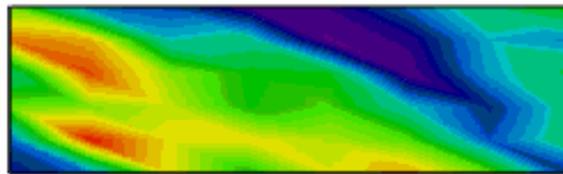
$n_e = 2.45 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3}$, $T_e = ? \text{keV}$, $B_0 = 2.75 \text{T}$

SHOT = "48672"

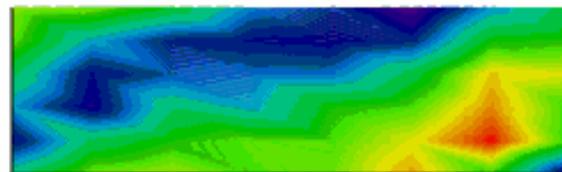
Time_ms = 0.2



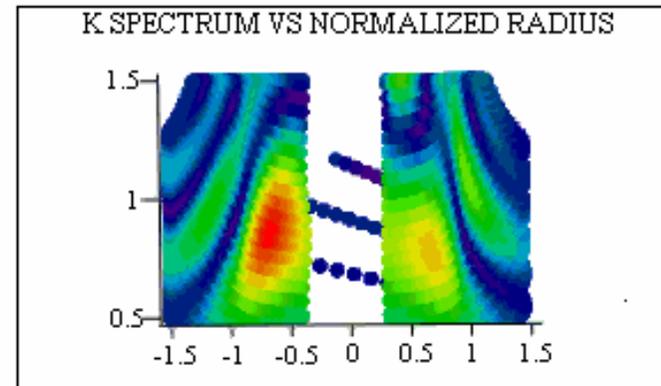
Raw



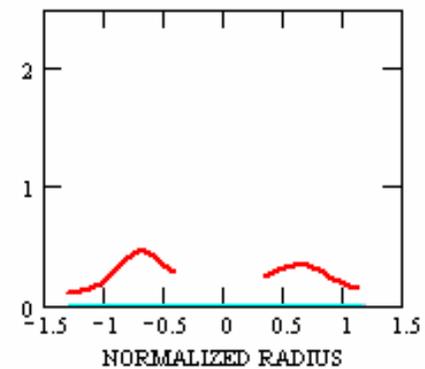
Top



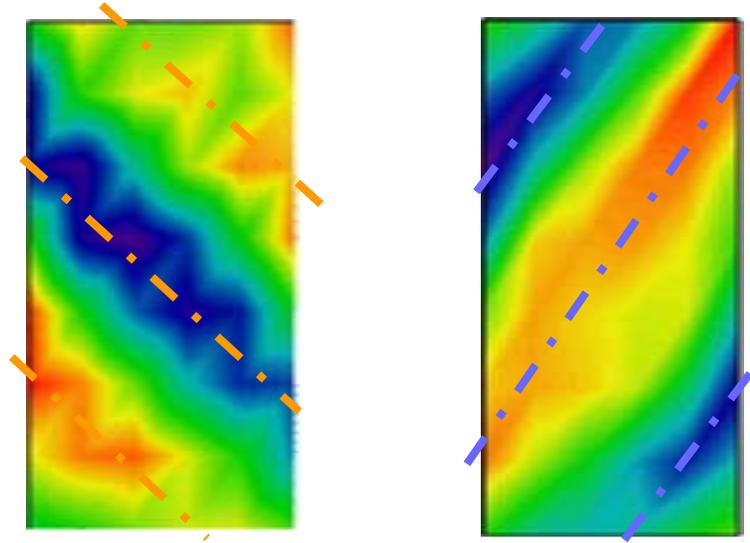
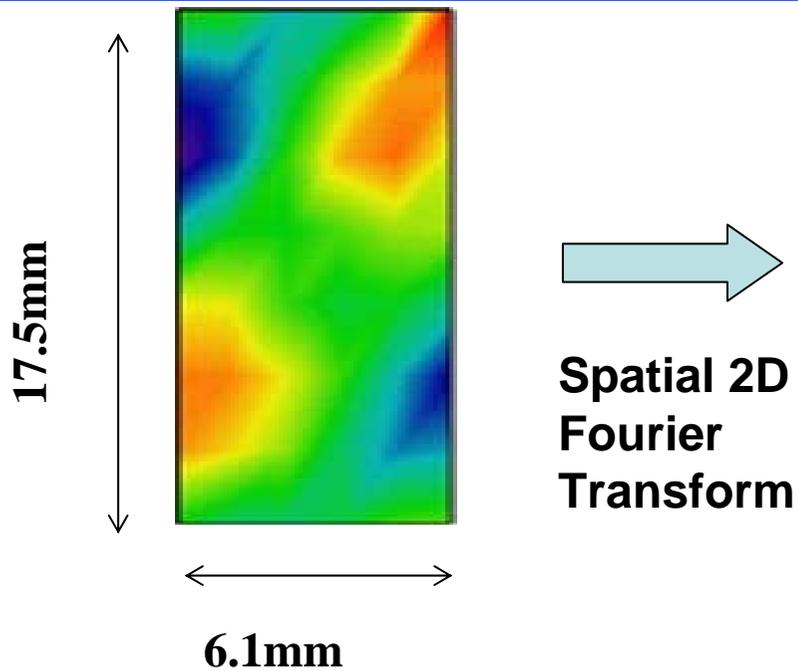
Bottom



DENSITY FLUCTUATIONS, a.u.

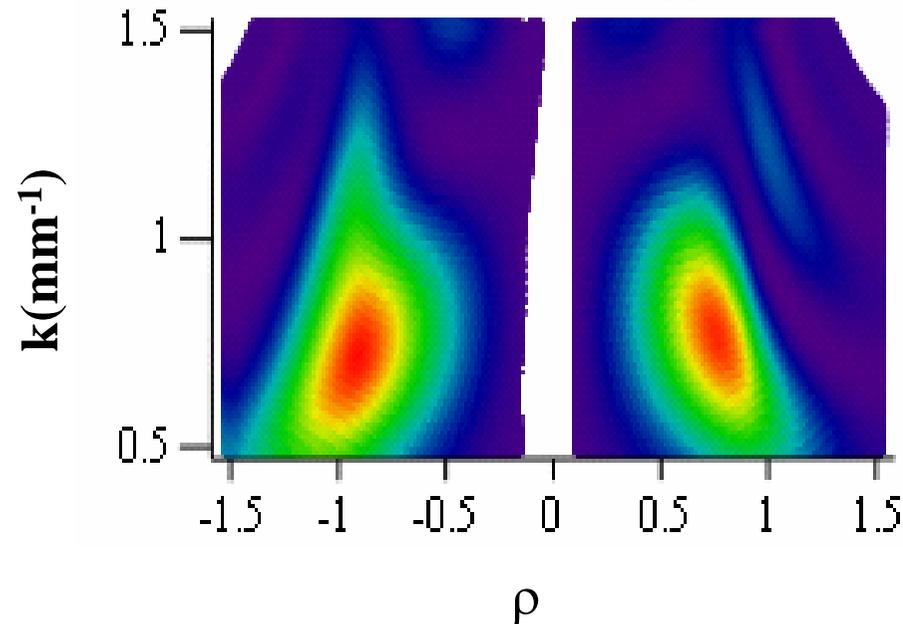


Example signal of 2D PCI



*Integrated 2D picture with
8x6=48ch 2D array*

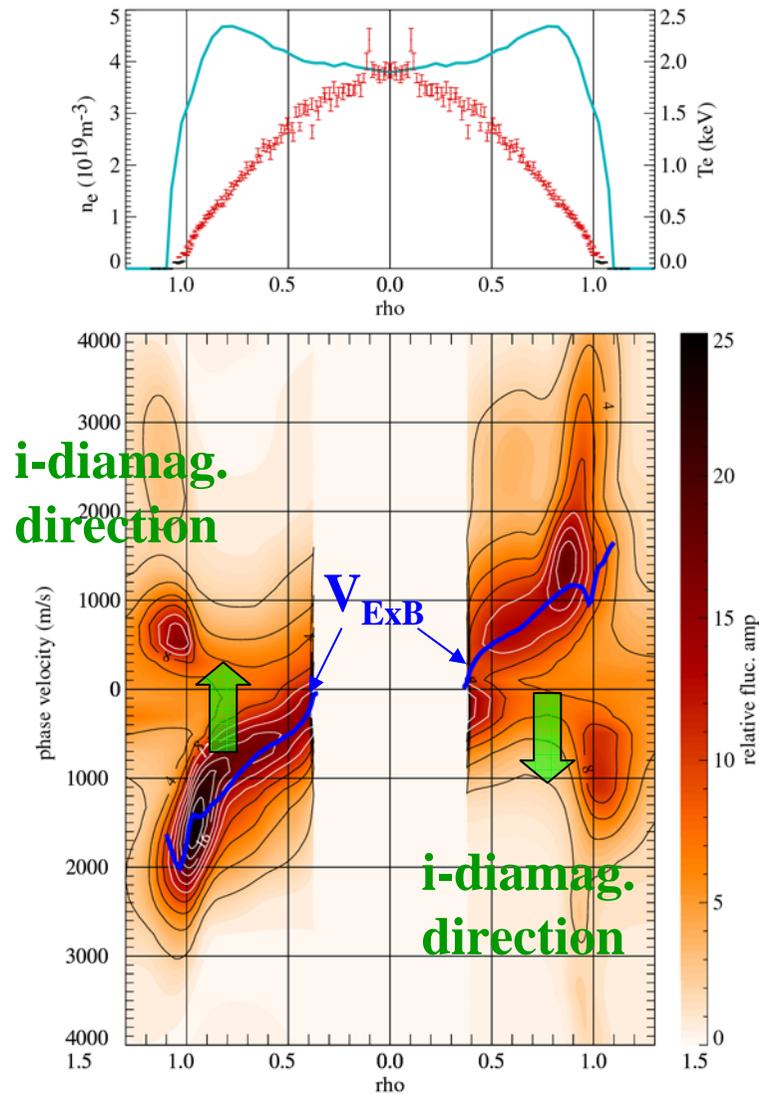
Present resolution is
 $a/3 \sim a/5$



A.Sanin, et al., RSI 2004 Oct

L.N.Vyacheslavov et al., to be published
IEEE special issue of plasma image 2005

Velocity spectrum shows ExB branch and i-diamag branch



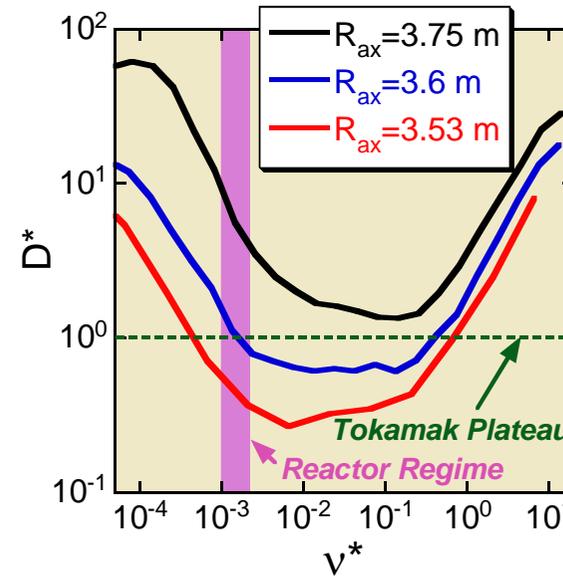
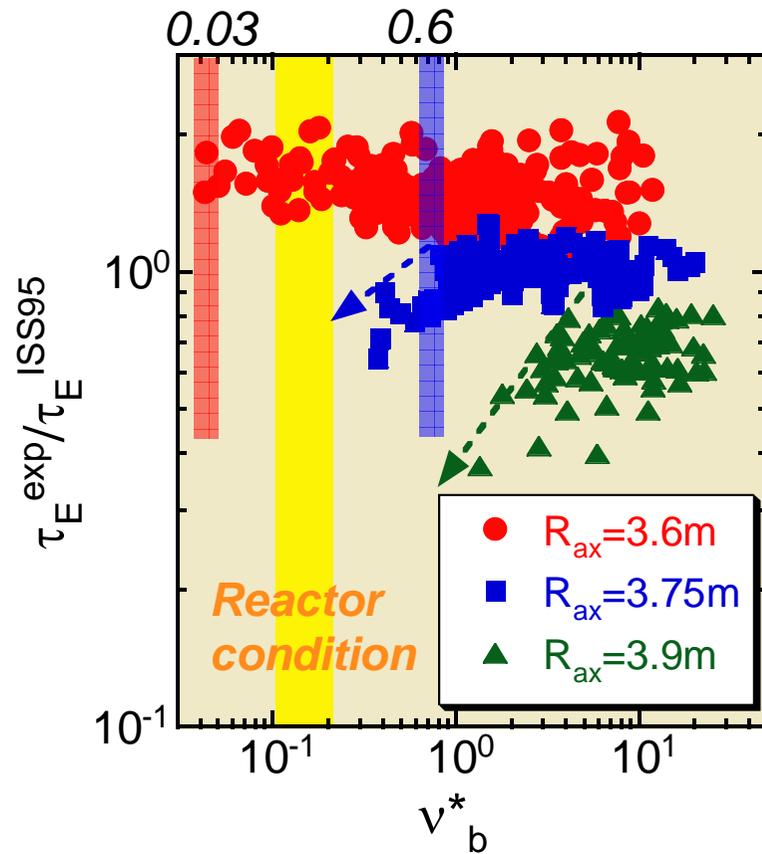
Core low k and edge e-diamag.
high k propagate ExB rotation
speed.

Edge i-diamag components
propagates in i-diamag
direction *in plasma frame*



Energy confinement is improved by shift of magnetic axis position

Inward shift of $R_{ax} \Leftrightarrow$ Optimization in terms of drift optimization



DCOM
by
S.Murakami

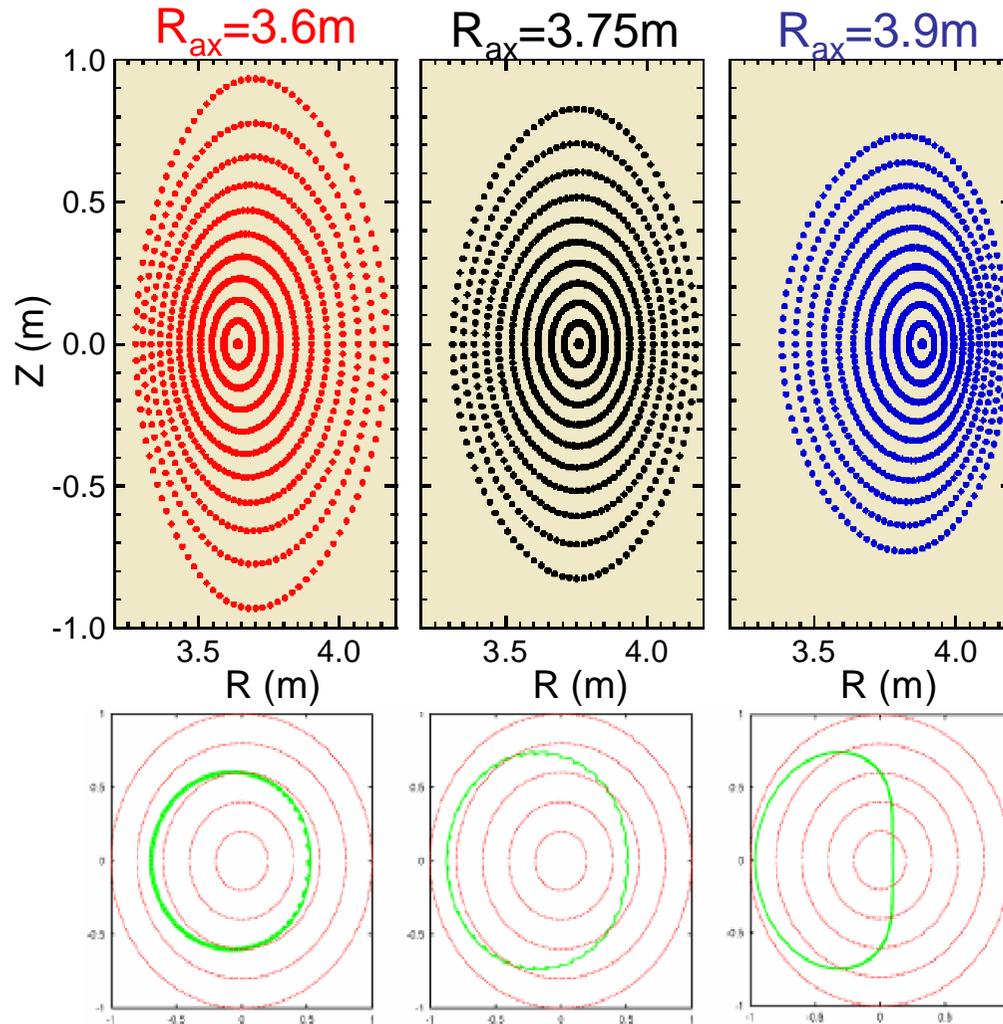
Effect of neoclassical transport is pronounced in **collisionless** regime

Confinement improvement by the inward shift of R_{ax} still exists in **collisional** regime

Neoclassical optimization is successful!
Much more than neoclassical theory!?

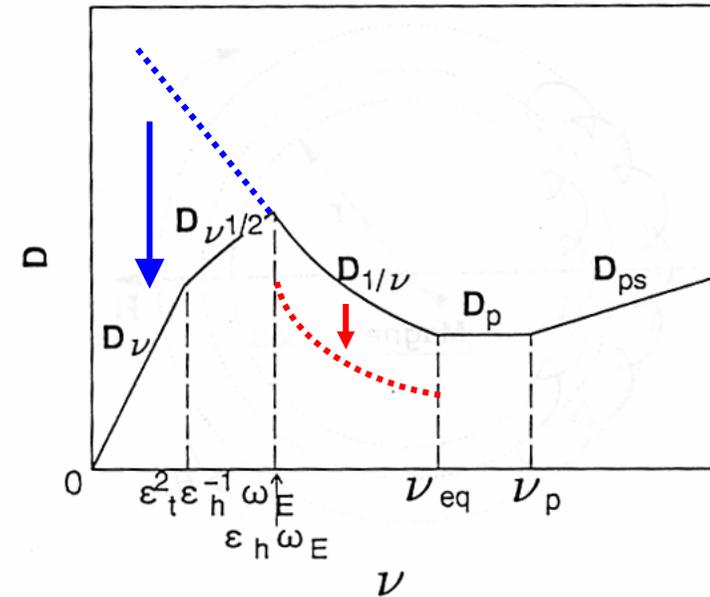


Confinement physics properties much depend on R_{ax}



Enhancement of magnetic hill

Deterioration of MHD stability



Neoclassical Scenario

- **1/ν regime** : geometrical effect

$$q_{1/\nu} \approx - \left(\frac{\epsilon_t}{erB} \right)^2 \epsilon_h^{1.5} \frac{T^{4.5}}{L_T}$$

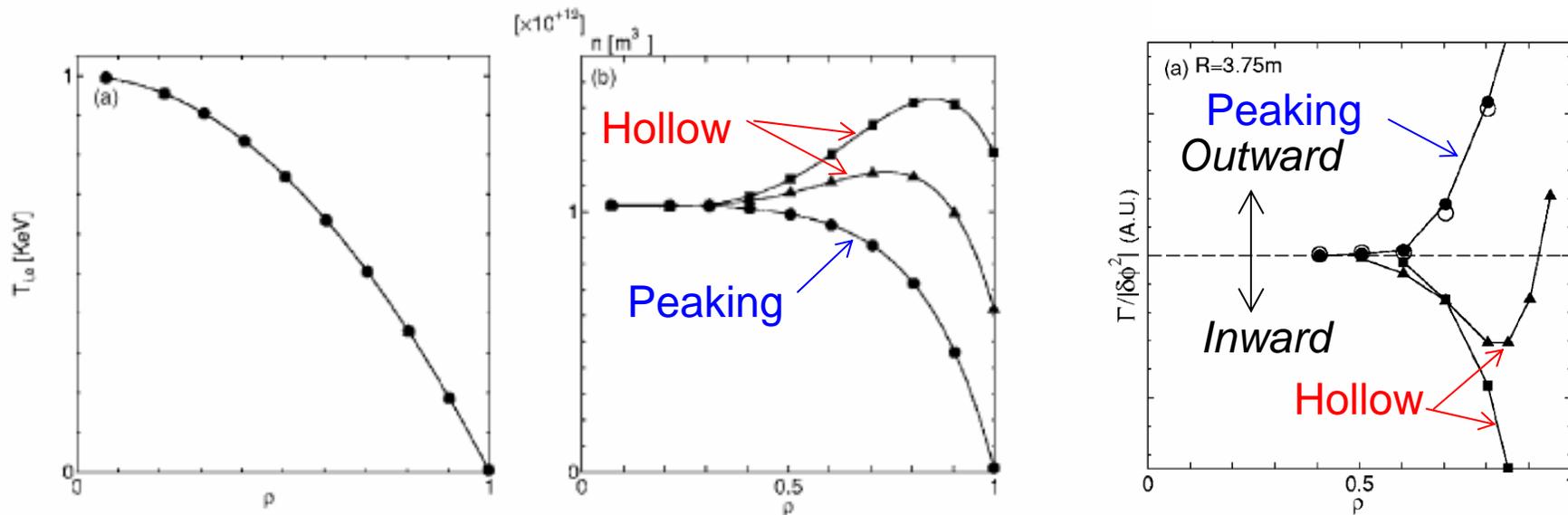
- **ν regime** : Large E_r in electron root

$$q_\nu \approx - \frac{\epsilon_t n^2}{E_r^2} \epsilon_h^{0.5} \frac{T^{1.5}}{L_T}$$

Elongation works as well

線形理論によればITG/TEMで誘起される粒子束は密度分布により方向が異なる。
 Yamagishi, POP 14, 012505 (2007)
 粒子束の方向は線形状態と非線形状態では一致。
 Dannert, Physcis Plasma 12,072309 (2005)

ソースの無視できる領域 ($\rho \leq 0.9$) で $\Gamma \sim 0$ 。



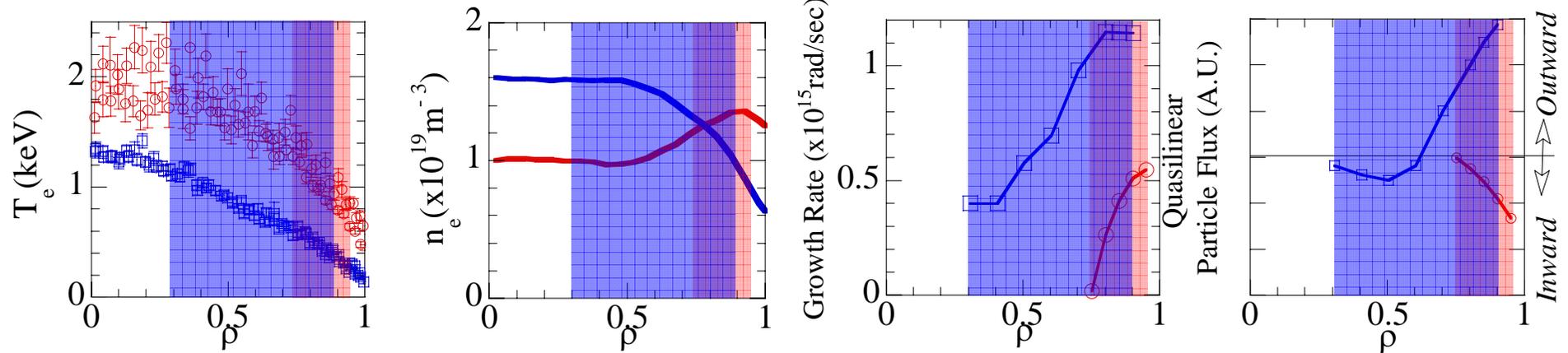
観測しているプラズマは乱流揺動が飽和している非線形状態。しかし、粒子束の方向は線形理論の結果と比較できる。

Hollow分布ではこの領域でITG/TEMによる線形理論による乱流駆動束は内向き。
 Hollow分布で拡散は内向き異常拡散であることと定性的に一致。

Peaking分布ではITG/TEM粒子束だけで $\Gamma \sim 0$ となり得る。

実験分布データを用いて線形計算でもhollow分布は正の密度勾配を、
peak分布は負の密度勾配を持つ領域でITG/TEMが不安定

Rax=3.53m, Bt=1.45T, $P_{\text{NBI}}=11.3\text{MW}$, $P_{\text{NBI}}=11.3\text{MW}$



Hollow密度分布ではITG/TEM粒子束は内向きを示す。→外向きの新古典粒子束とつりあう。

Peaking密度分布では $\rho < 0.6$ でITG/TEM粒子束 + 外向き新古典 ~ 0 が可能。

実験結果を完全に説明するには $\rho < 0.8$ の領域で hollow分布で内向き、peaking分布で粒子束 ~ 0 になるはず。→現在のところ傾向は一致するものの空間領域については完全な一致ではない。