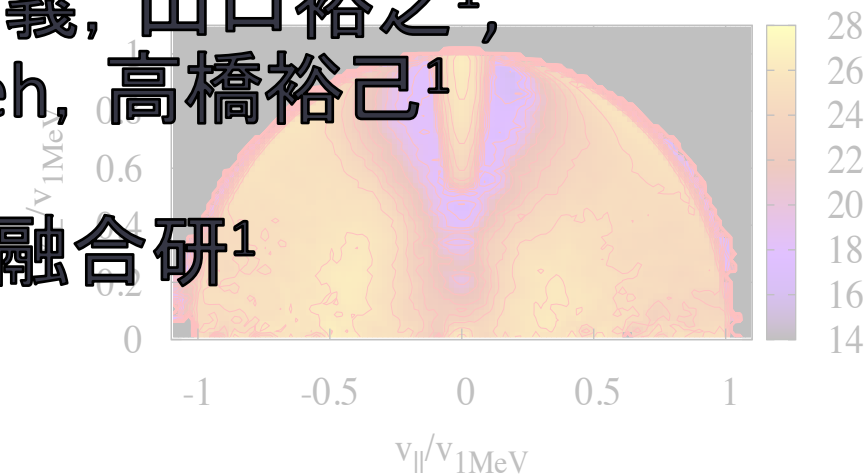
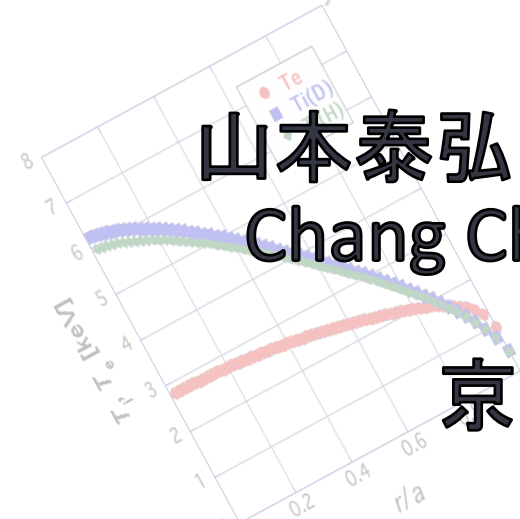
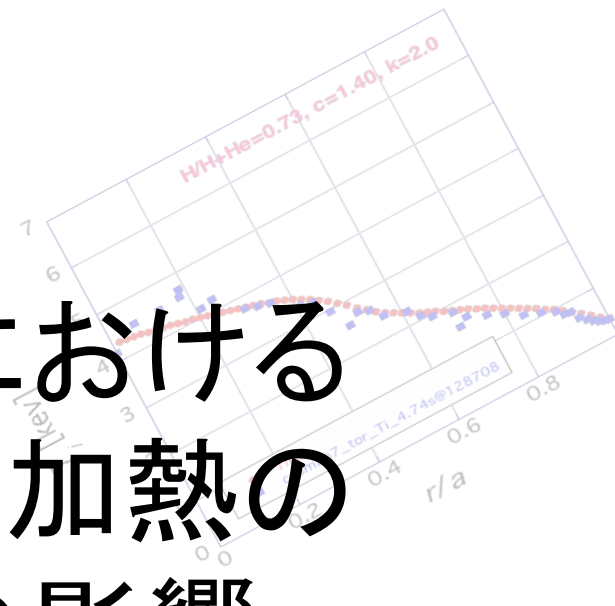
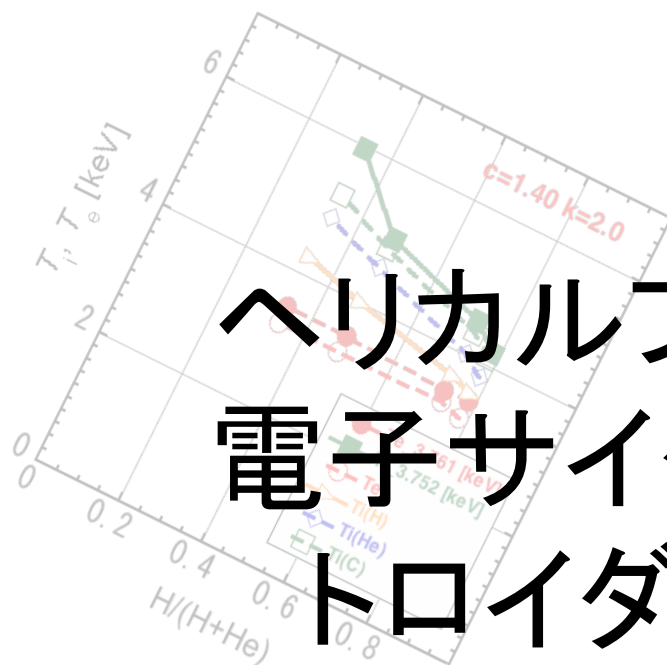


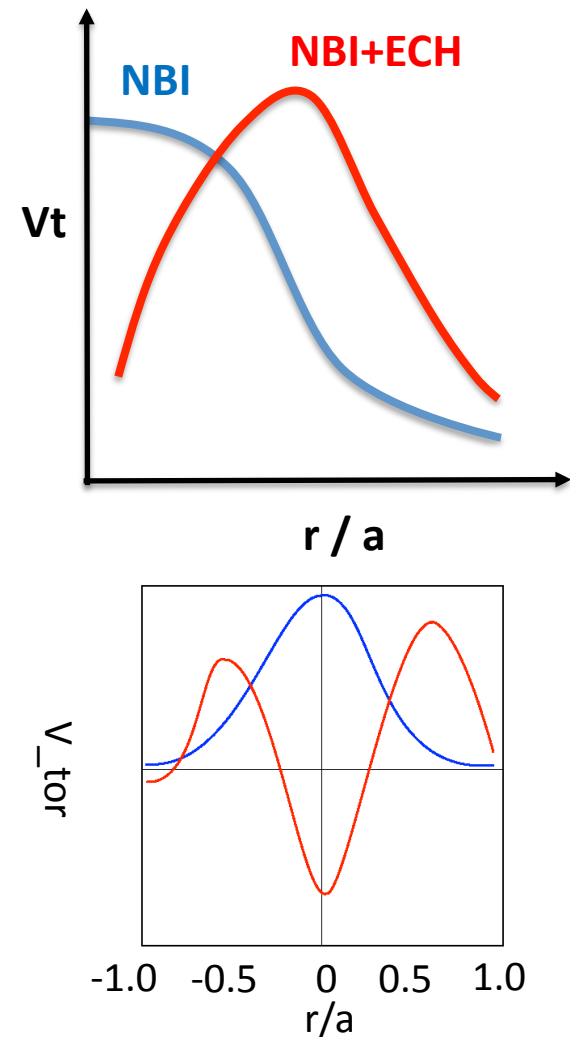
ヘリカルプラズマにおける 電子サイクロトロン加熱の トロイダル流への影響

山本泰弘, 村上定義, 山口裕之¹,
Chang Ching-Chieh, 高橋裕己¹

京大工, 核融合研¹



- トロイダル流とそのシアは乱流を抑制し、閉じ込め改善において重要であることが実験的に示されている.
- 将来の核融合炉に向け、自発的トロイダル流駆動現象の解明が求められている.
- LHDにおいて、NBI加熱によって維持されたプラズマ中にECHを行うと、トロイダル流が大きく変化することが得られている.
- 本研究では、ECHによって発生する高エネルギー電子の径方向拡散がもたらすイオンのリターン電流の $j \times B$ トルクがこの現象において重要であると仮定し、LHD 実験結果の検証を行うことを目的とする.



- Monte Carlo法により空間3次元・速度空間2次元の5次元位相空間におけるドリフト運動論方程式を解くことで、電子の速度空間分布を評価することのできるGNETコードを用いる。

[S.Murakami et.al, Nucl.Fusion (2000)]

- テスト粒子の軌道を6次のRunge Kutta法を用いて高精度で追跡する。

$$\frac{\partial \delta f}{\partial t} + (\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_{\parallel}) \cdot \frac{\partial \delta f}{\partial \mathbf{r}} + \dot{\mathbf{v}} \cdot \frac{\partial \delta f}{\partial \mathbf{v}} - C^{coll} = S^{ql}$$

$$f = f_0 + \delta f$$

δf : 電子の速度分布関数の摂動項

\mathbf{v}_d : ドリフト速度

C^{coll} : 衝突項

\mathbf{v}_{\parallel} : 磁場に平行な速度

S^{ql} : ECH準線形拡散項

$$S^{ql}(f_{Max}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \frac{\partial}{\partial v_i} D_{ij}^{ql} \frac{\partial f_{Max}}{\partial v_j}$$

$$S^{ql} = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \frac{D}{v_{the}^2} \left(\frac{v_{\perp}}{v_{the}} \right)^2 \left[2 - \left(\frac{v_{\perp}}{v_{the}} \right)^2 - v_{\perp}^2 \frac{\gamma^3}{\Delta c^2} \left(1 - \frac{k_{\parallel} v_{\parallel}}{\omega} \right) X \right] \exp(-X^2) f_{Max}$$

$$(X = (\gamma(1 - k_{\parallel} v_{\parallel} / \omega) - 2\Omega_{ce} / \omega) / \Delta)$$

v_{the} : 熱速度

c : 光速

γ : ローレンツ因子

r_0 : 加熱位置

k_{\parallel} : 波数ベクトルの水平成分 Ω_{ce} : 電子サイクロトロン周波数

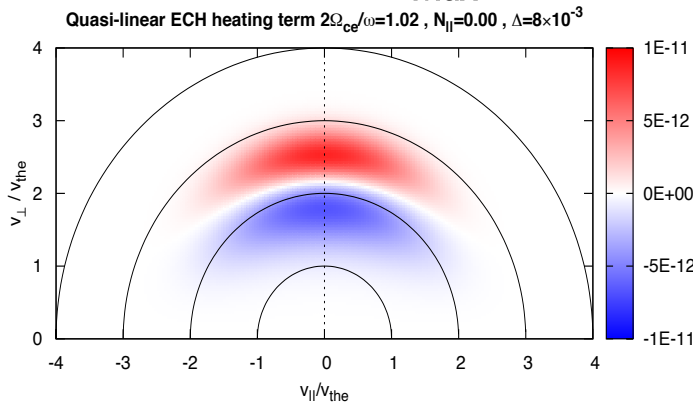
v_{\perp} : 速度の垂直成分

ω : 波の周波数

Δ : 微小パラメータ ($\ll 1$)

v_{\parallel} : 速度の平行成分 f_{Max} : Maxwell分布

D : 速度に依存しない係数

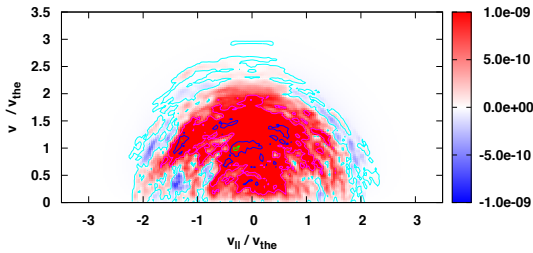


今回用いたECH準線形拡散項の例

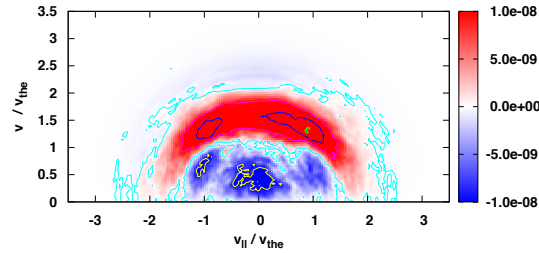
- EC波について, 154GHzのX波 $\cdot N_{\parallel}=0$
- 実空間の加熱位置は実験において計測されたものに対応.

速度空間上において青い領域の電子数が減少し, 赤い領域の電子数が増加していることを表す.

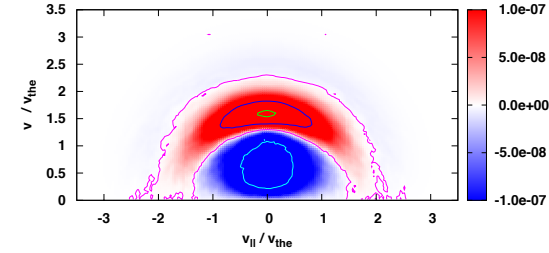
$r/a=0.0$



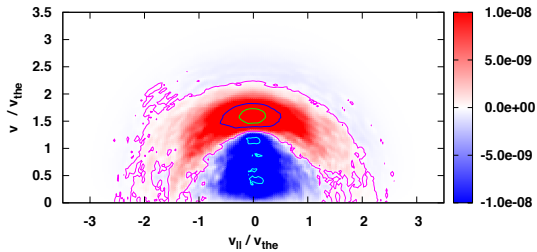
$r/a=0.1$



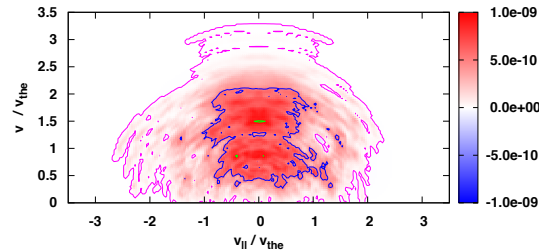
Total



$r/a=0.2$



$r/a=0.5$



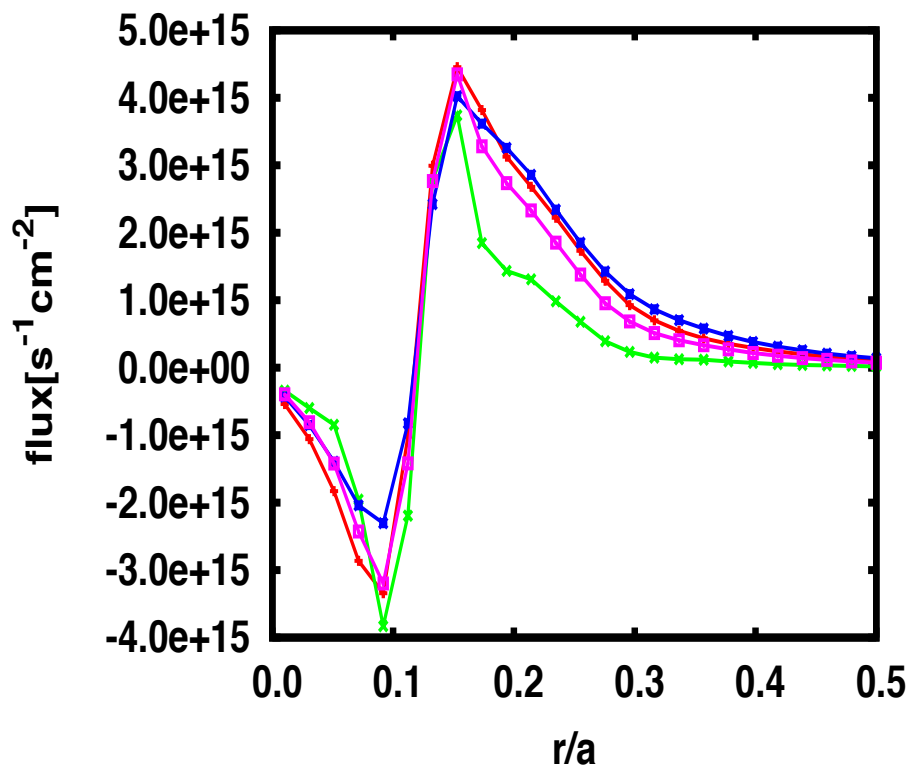
加熱位置($r/a \sim 0.1$)よりも
径方向内側・外側で加熱さ
れた電子が多く観測できる。

➡ 電子が径方向に拡散し、リターン電流が発生

電子の径方向フラックス

$$S^{ql} = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \frac{D}{v_{the}^2} \left(\frac{v_{\perp}}{v_{the}} \right)^2 \left[2 - \left(\frac{v_{\perp}}{v_{the}} \right)^2 - v_{\perp}^2 \frac{\gamma^3}{\Delta c^2} \left(1 - \frac{k_{\parallel} v_{\parallel}}{\omega} \right) X \right] \exp(-X^2) f_{Max}$$

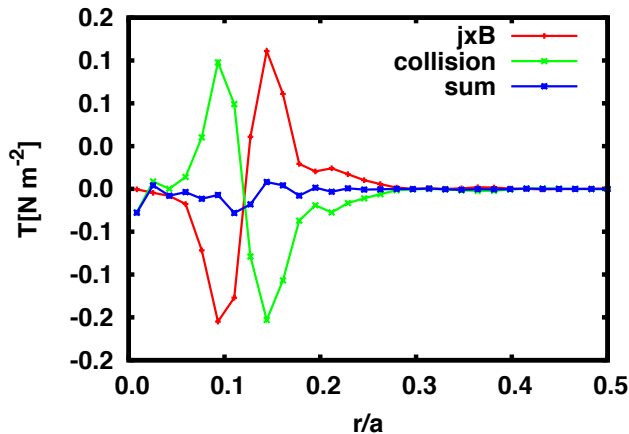
$$(X = (\gamma(1 - k_{\parallel} v_{\parallel}/\omega) - 2\Omega_{ce}/\omega)/\Delta)$$



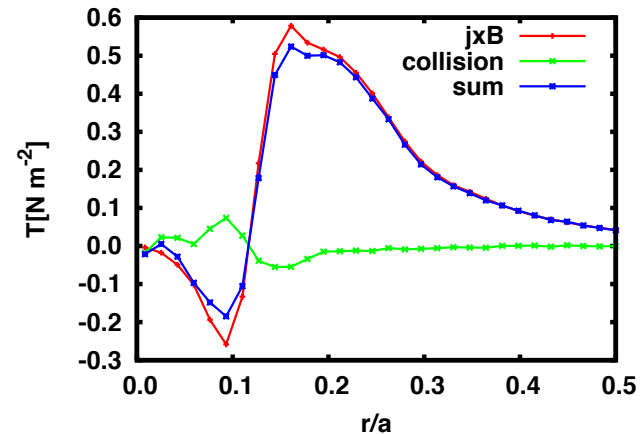
- $2\Omega_{ce}/\omega = 1.02, \Delta = 8 \times 10^{-3}$
- ×— $2\Omega_{ce}/\omega = 1.002, \Delta = 8 \times 10^{-3}$
- $2\Omega_{ce}/\omega = 1.02, \Delta = 2 \times 10^{-2}$
- $2\Omega_{ce}/\omega = 1.001, \Delta = 2 \times 10^{-2}$

テスト粒子のパラメータの違いによって生じる差は大きくない。
 磁場強度と加熱位置から
 $2\Omega_{ce}/\omega = 1.02$ 程度であるので今回は
 $2\Omega_{ce}/\omega = 1.02, \Delta = 8 \times 10^{-3}$ を用いる

軸対称な磁場配位

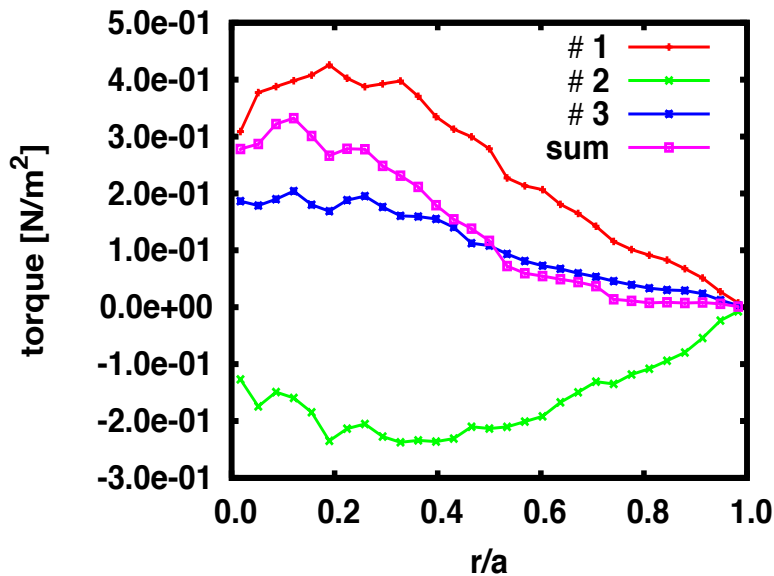


LHD磁場配位

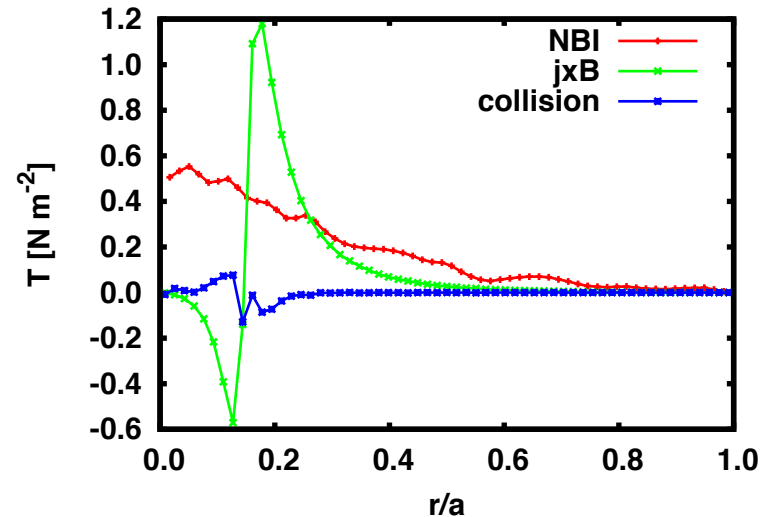


- 各位置でのリターン電流による $j_r \times B_\theta$ を評価し、電子のトロイダル方向における運動量変化を求めることで衝突による摩擦力を評価した。
- 磁場配位が軸対称である場合、リターン電流による $j \times B$ と摩擦力は釣り合うことが知られている [ROSENBLUTH, HINTON, NF1996].
=>ECHによる $j \times B$ と摩擦力もつりあうことが確認できる
- LHD磁場配位においては、 $j \times B$ は摩擦力と比較して有意に大きい。

NBITorque



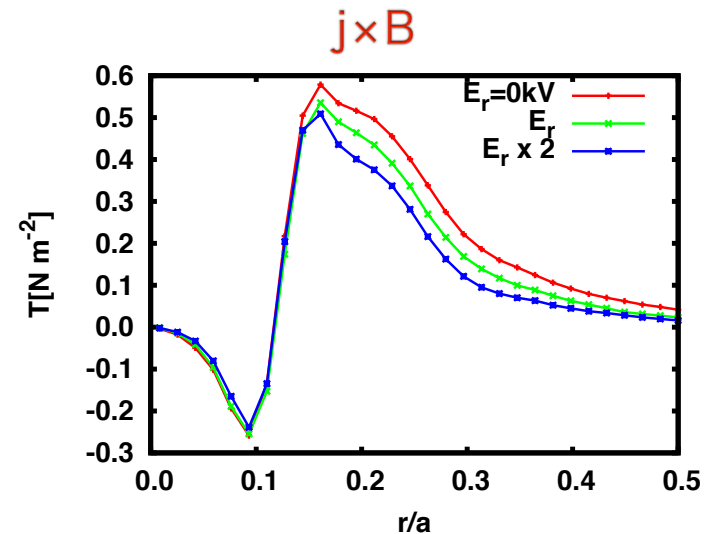
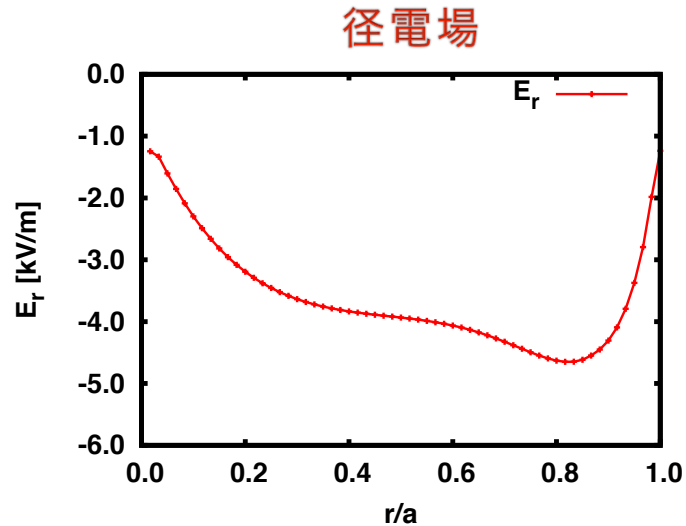
NBIとECHトルクの比較



実験における加熱パワー
・ 入射エネルギー

Co #1	190keV	6.12MW
Ctr #2	176keV	4.75MW
Co #3	170keV	2.23MW

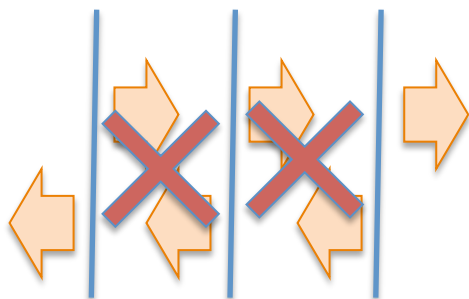
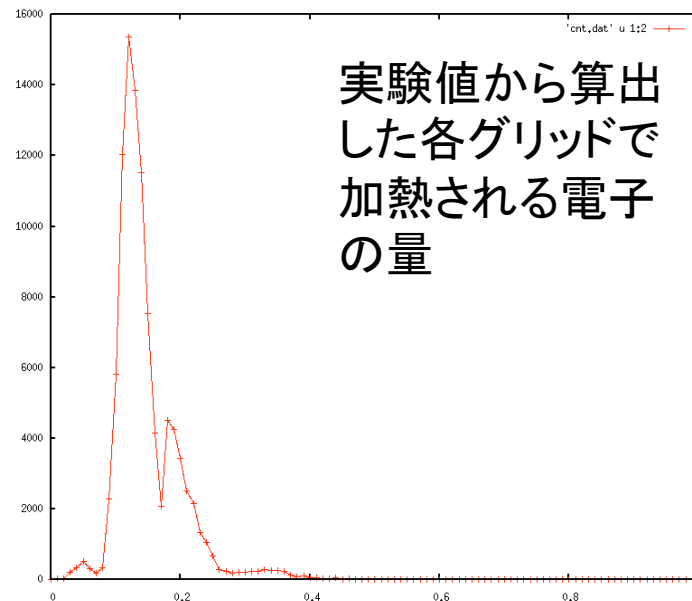
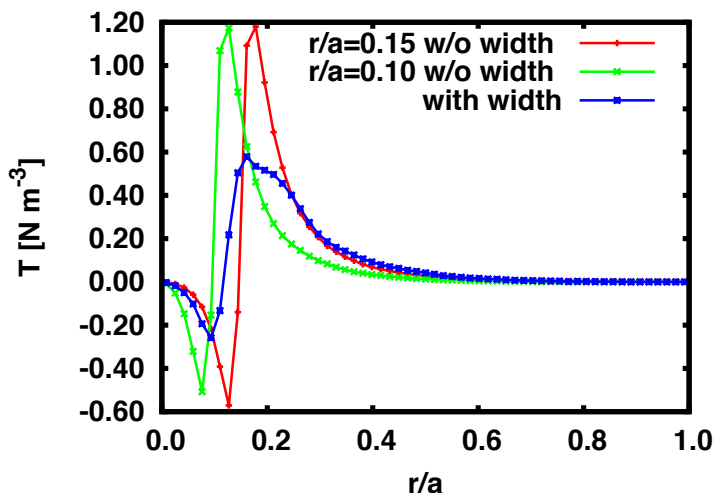
ECHによるjxBトルクは NBIによるトルクと比較して、**中心部で逆方向、かつ同程度に大きい**



- ◆ 今回のパラメータに対して典型的な径電場が存在する時の、ECHによる $j \times B$ の大きさの変化を評価した
- ◆ 径電場が強くなるにつれ径方向のフラックスが減少し、 $j \times B$ の値も減少する。

ECHの加熱位置の広がり

ECHの加熱位置に広がりをもたせることで、 $j \times B$ の大きさが変化する



広がりをもつことで、打ち消されるフラックスが生じ、1/2程度に減少.

→加熱分布のピークの程度が影響

- 円筒プラズマで近似したトロイダル流の1次元拡散方程式

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{m_i n_i R} (T_{j \times B} + T_{NBI} + T_{fric} + T_{NTV})$$

を解くことでトロイダル流速Vを求める.

D: 径方向拡散係数, T: $j \times B$, NBI, 摩擦, 新古典粘性トルク
 T_{NTV} について,

$$T_{NTV} = -m_i n_i \mu_{ti} \frac{\tilde{B}_{eff}^2}{B_0^2} [\langle RV \rangle - \langle R^2 \Omega_* \rangle]$$

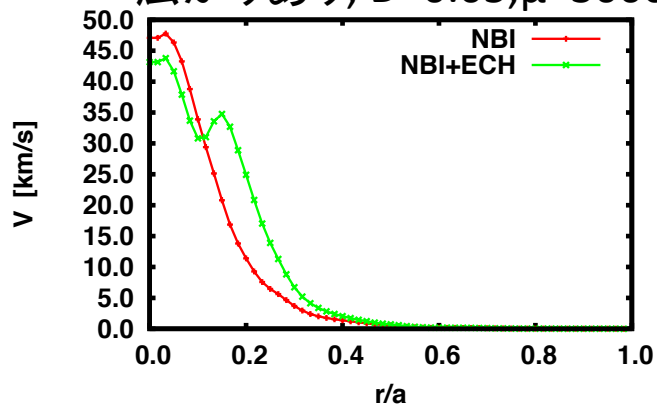
オフセットの第二項は今回は無視した.

- NBIを0.5秒入射後, ECHを0.5秒重畳させることを考える. また, ECHの加熱は154GHz・ $N_{||}=0$ のX波のみとして計算する.
- CHSにおけるトロイダル粘性係数($\sim \mu_{ti} B_{eff}^2 / B_0^2$)は $10^2 \sim 10^4$ 程度であるため[Ida, PoP1997], 今回は, B_{eff}^2 / B_0^2 が $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度であることから, $\mu_{ti} \sim 10^5$ 程度と仮定する.

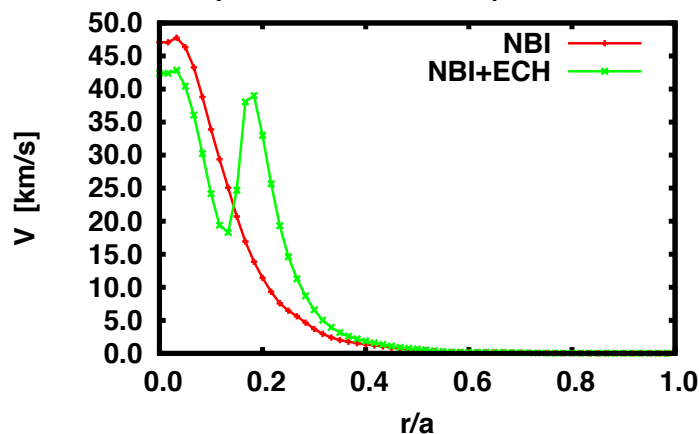
トロイダル流

NTVを考慮し, NBIのみで実験を再現
→ECHトルクを加える

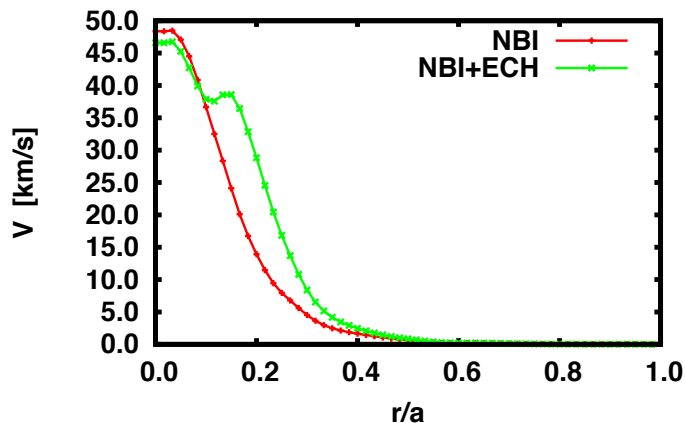
広がりあり, $D=0.05, \mu=300000$



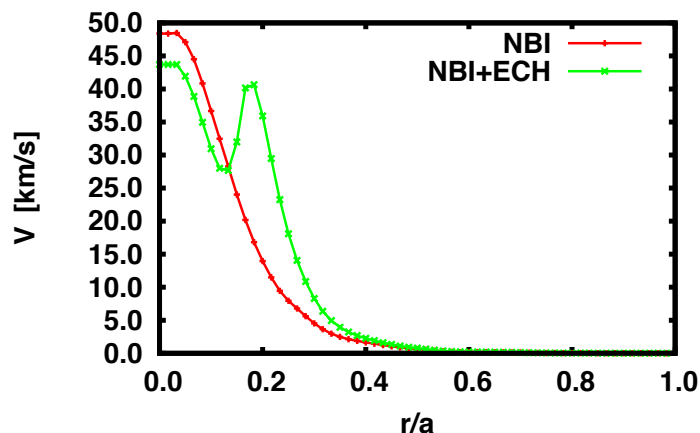
1point, $D=0.05, \mu=300000$



広がりあり, $D=0.1, \mu=250000$

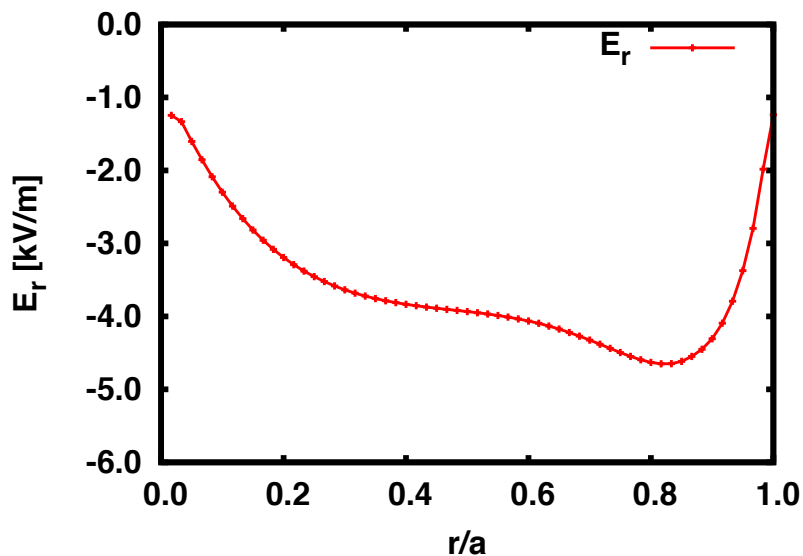


1point, $D=0.1, \mu=250000$

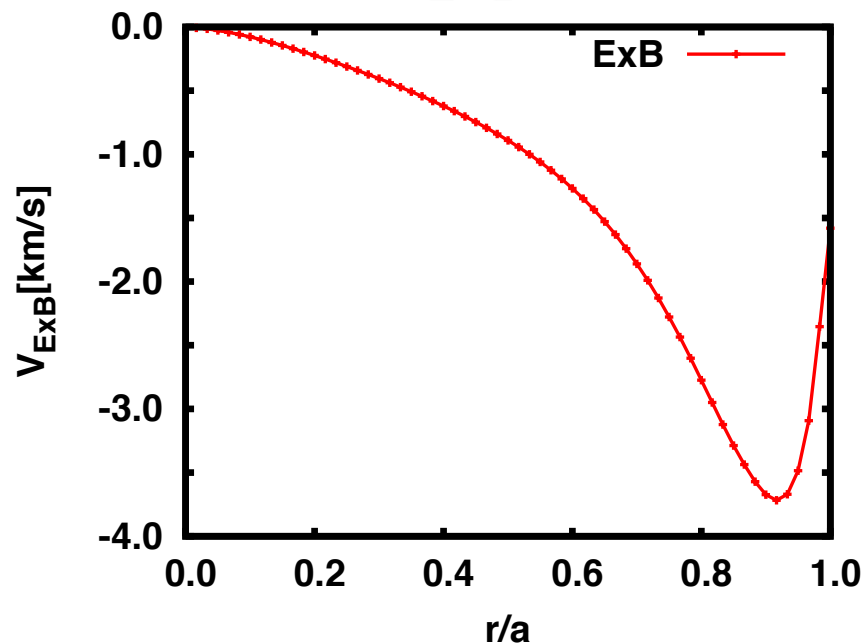


ECHによる $j \times B$ のトルクを用いることで
トロイダル流の中心部が減少する

径電場



$E \times B$



- ◆ 今回のパラメータに対して典型的な径電場を用いて、 $E \times B$ によるバルクプラズマの流れを評価した。
- ◆ 絶対値が3km/sと小さく、しかも周縁部で大きくなることから、トロイダル流中心部の変化に対しては影響が小さいことがわかった。

まとめ

- ◆ LHDのNBI加熱プラズマにおけるECH重畳によるトロイダル流反転を解明するため、GNETコードを用いてECHを行った際の高エネルギー電子の径方向拡散を評価した。
- ◆ LHDにおいては、ECHによる $j \times B$ のトルクは、高エネルギー電子が発生する摩擦力によるトルクよりも大きいことが示された。
=>非軸対称性による径方向流束が支配的
- ◆ ECHによるトルクは、NBIによるトルクと比較して同程度の大きさをもつことを示した。
- ◆ トルクによって発生するトロイダル流を評価し、トロイダル流が加熱位置より中心部で減少し、外側で増加する傾向を示した。

今後の課題

- ◆ 粘性の変化・ECHの入射角による変化を調べる
- ◆ 新古典粘性項・拡散係数を決定する
- ◆ NBIによるトルクを詳しく評価する