

## LHDでの流れ分布の形成

MHDの安定化やプラズマの輸送の改善という観点から、流れの分布が注目されていた。  
ITERでは、流れの駆動が外部トルク源としては不足であるため、運動量輸送における非対角項の効果による自発的流れというものに関心がもたれた。

「プラズマの流速度分布」は、温度分布、密度分布といったものとともに、プラズマの状態を表す一つのパラメータであり、荷電交換分光計測を用いて観測してきた。

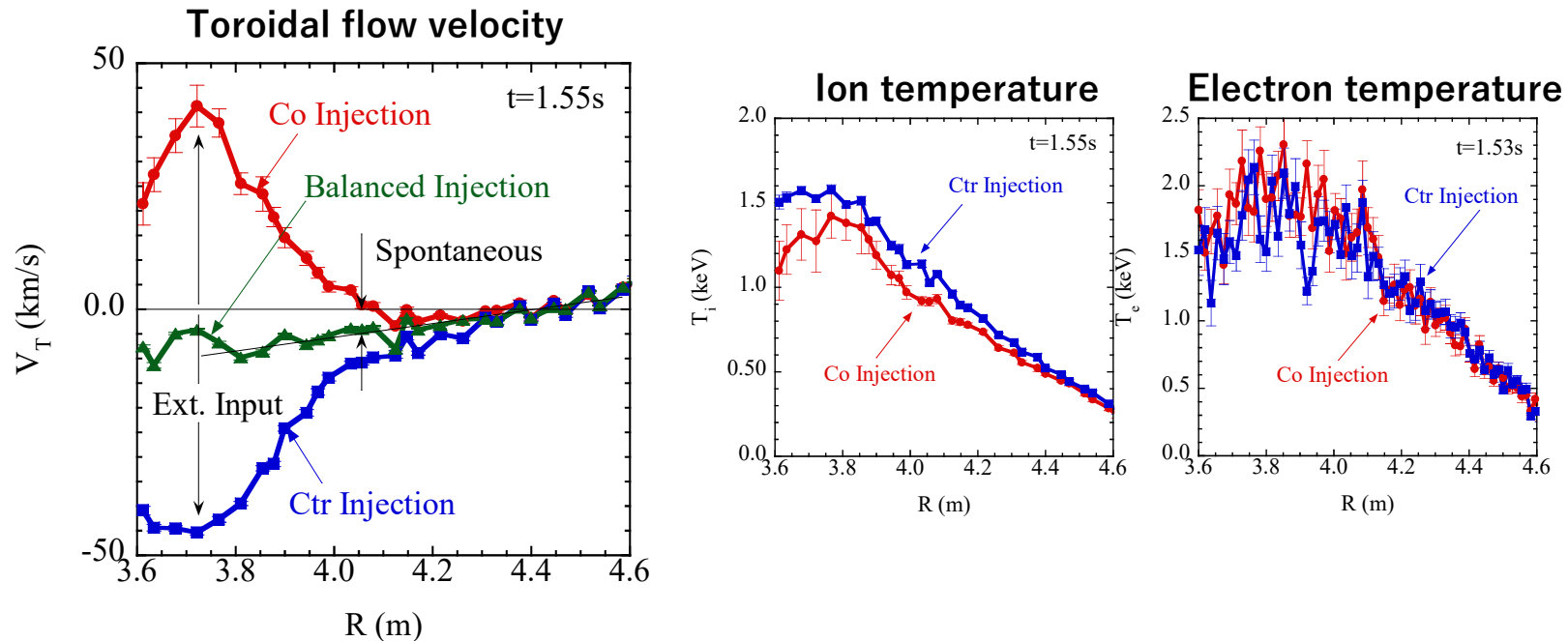
特に、トロイダル方向の流れは、接線NBIを用いたオペレーションと密接に関係している。

LHD装置において、オペレーションの違いによってさまざまなプラズマが生成される。

そのような中で、どのような流れが形成されていくのかが興味深い。

- NBI入射による外部駆動による流れ
- 電場による回転とトロイダル方向の流れ
- イオン温度勾配形成にともなう自発的な流れ
- コリジョナリティで向きが変化する自発的な流れ

# Profile of NBI driven toroidal flow



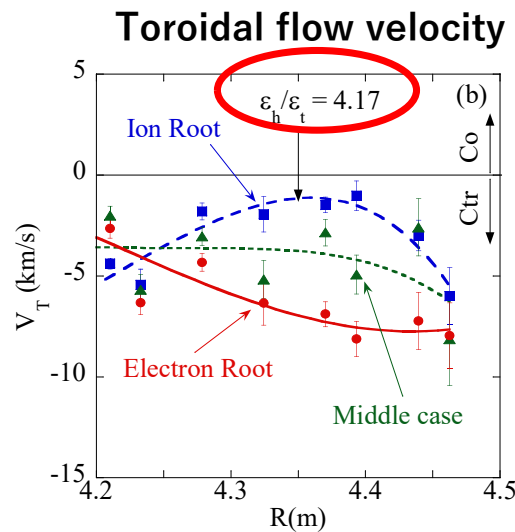
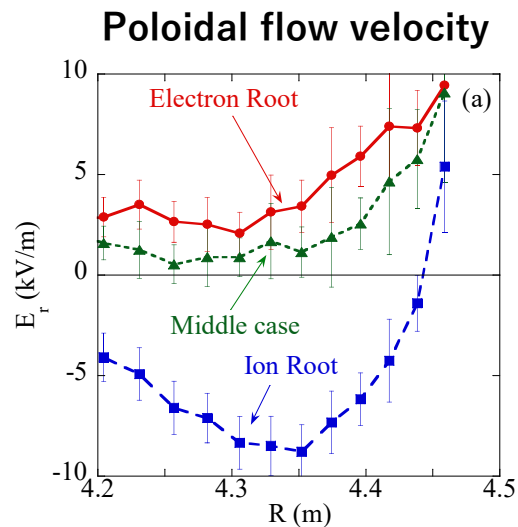
The NBI driven component is **small at the plasma edge** while it is **significant in the plasma core**.

It is considered to be the result come from the strong helical ripple and small deposition of the NBI power at the plasma edge.

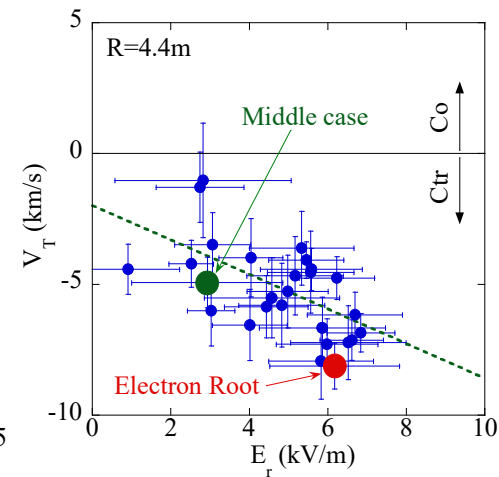
The experiments for the spontaneous flow is performed around the edge region.

# $E_r$ driven Spontaneous flow at plasma edge.

The  $E_r$  can be changed by controlling of the electron density, and we observed the toroidal flow at the plasma edge.

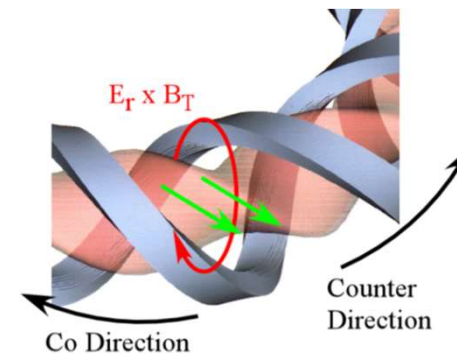


**Dependence of toroidal flow velocity on radial electric field**



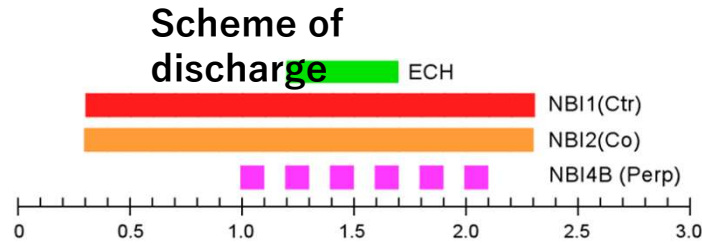
The poloidal flow driven by  $E_r \times B$  is redirected to the direction of helical pitch which has minimum gradient of magnetic field strength.

**Positive  $E_r$  drives the toroidal flow in the counter-direction at the plasma edge.**



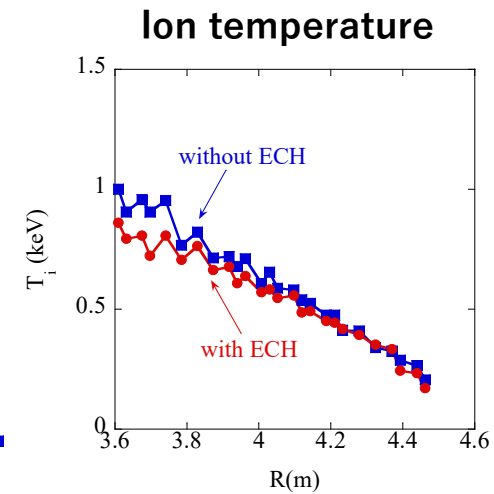
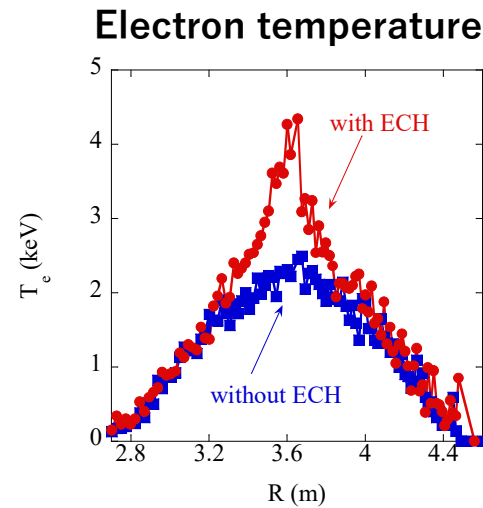
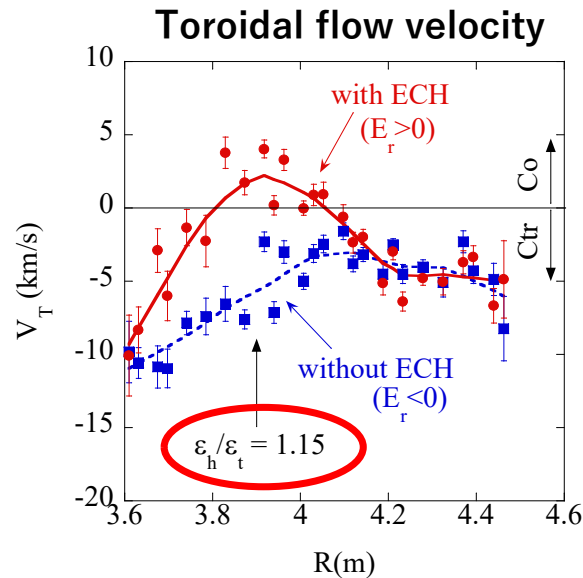
$B=1.5\text{T}$   $R_{ax}=3.6\text{m}$   $\gamma=1.174$   $Bq=100\%$

# $E_r$ driven Spontaneous flow in plasma core.



ECH is injected into the NBI sustained plasma ( $\langle n_e \rangle \sim 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ).

The NBI is injected with balanced combination to make the NBI driven flow small.



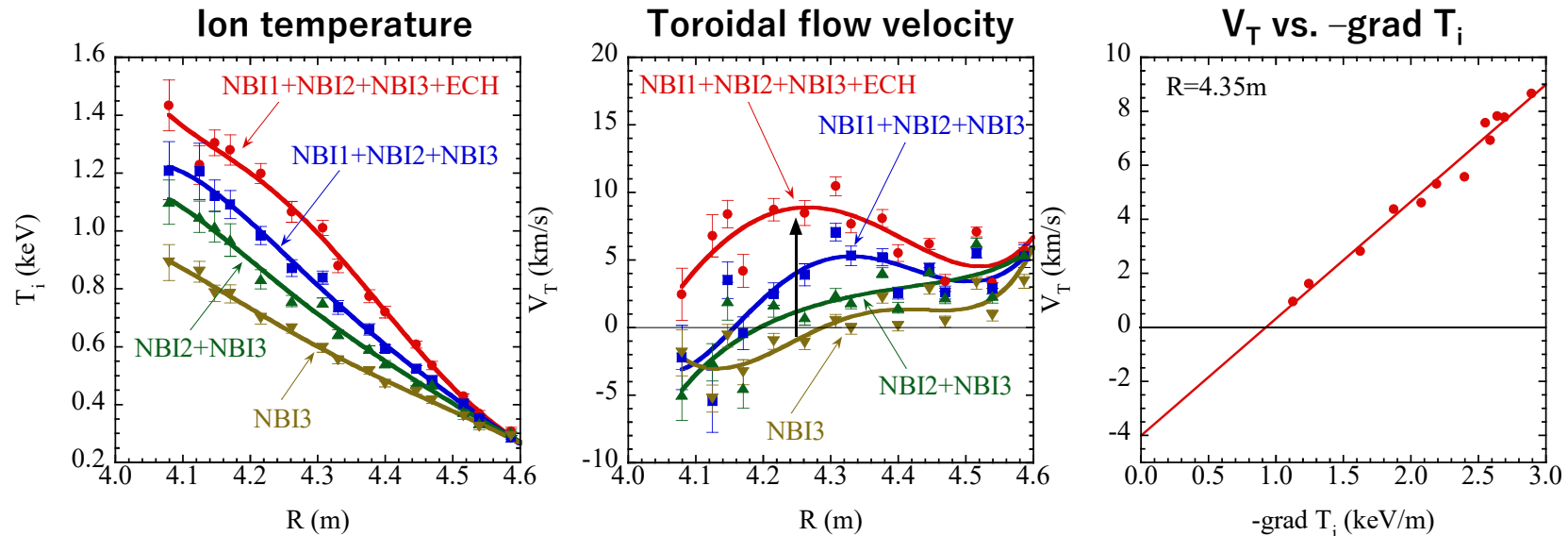
During ECH, the positive radial electric field appears associated with the formation of the electron-ITB.

➡ **Positive  $E_r$  drives the flow in the co-direction near the plasma core.**

# Observation of gradient $T_i$ driven Spontaneous flow

Power scan experiment is performed with NBI sustained plasma.

The line averaged electron density  $n_e$  of  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  is kept constant during the discharge.



Steep gradient of ion temperature is produced by increasing of injection power of NBI.

Toroidal velocity changes into co-direction associated with the increasing the ion temperature gradient around  $R=4.3\text{m}$ .

**Ion temperature gradient drives the toroidal flow in the co-direction.**

# 高イオン温度放電での流れの分布

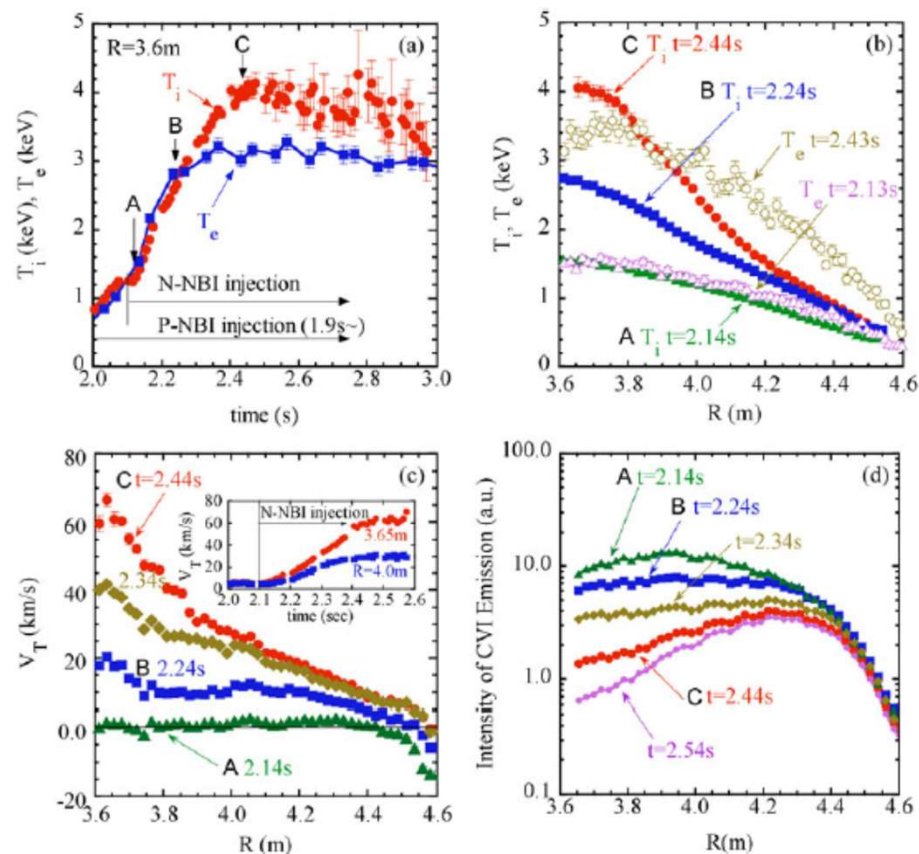
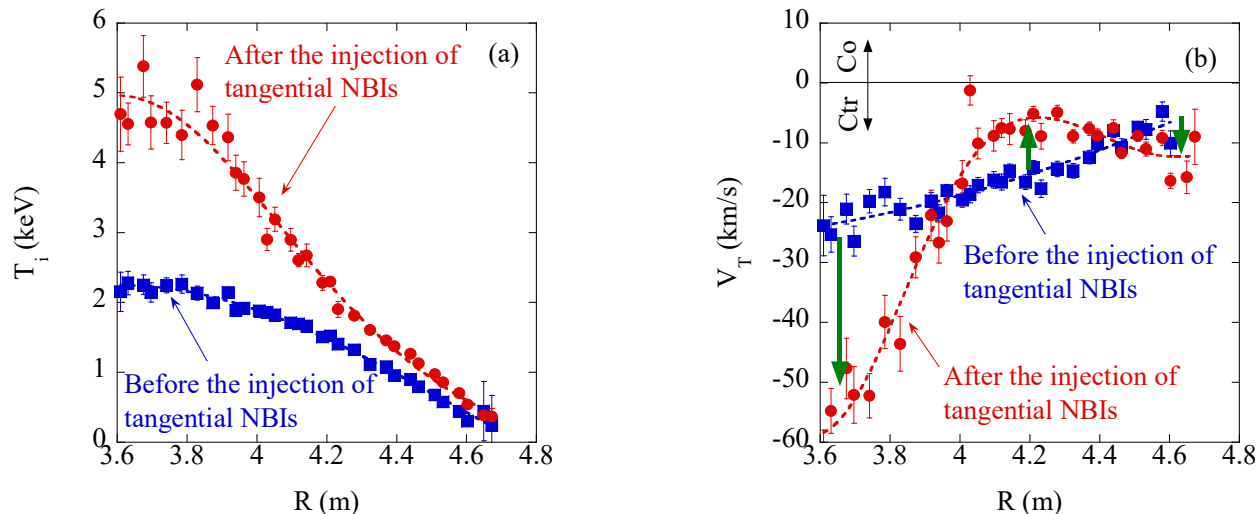


Fig. 1. (a) Evolutions of central ion temperature and electron temperature and radial profiles of (b) ion temperature and electron temperature, (c) toroidal flow velocity, and (d) intensity of the C VI emission in the high-ion temperature discharge.

## Understandings of the flow profile in high $T_i$ plasma



**After the injection of tangential NBI,**

a) High temperature plasma is produced with the injection of tangential NBI, dominantly injected **in the counter-direction**.

**NBI driven flow is observed at the plasma core (counter-direction).**

b) Steep gradient of the ion temperature is formed **near the mid-radius of the plasma**.

**Grad- $T_i$  drives the spontaneous flow into the co-direction.**

c) Radial electric field changes from negative (-5kV/m) to the positive (5kV/m) **at the plasma edge**.

**$E_r$  driven spontaneous flow into the counter-direction.**

# コリジョナリティで向きの変化する自発的な流れ

バランス入射を行ったときに観測される流れ（＝自発的な流れ）が、コリジョナリティによってその向きを変化させる

K.Nagaoka et al. Phys. Plasmas 20, 056116 (2013).

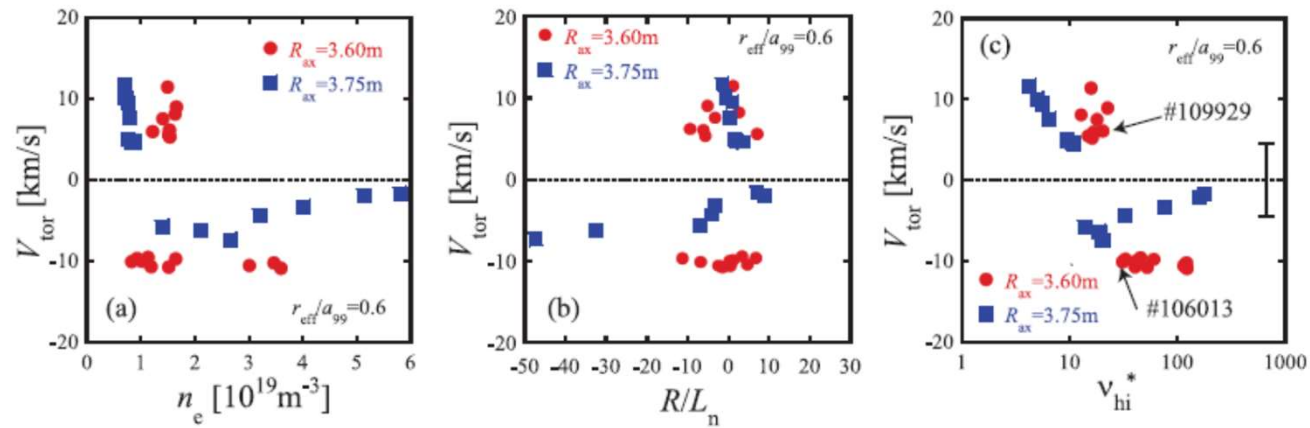


FIG. 2. Spontaneous flow velocity measured at  $r_{\text{eff}}/a_{99} = 0.6$  without net external driving force as functions of (a) electron density at  $r_{\text{eff}}/a_{99} = 0.6$ , (b) normalized density gradient, and (c) the normalized collisionality.



# NBIで駆動される流れでさえ、単純ではなさそう

高Ti放電では、イオン温度勾配の増加とともに、Co方向の流れが生じることが観測されている。

運動量輸送への非対角項の効果  
温度勾配によるトロイダル流駆動  
CoおよびCtr方向への流れの非対称性

高Tiほどではない、通常の放電でトロイダル流の生じ方を調べる

ビーム切り替えによる外部駆動トロイダル流速の変化の観測を観測する

**流れのダイナミックな変化に注目してみる**

# Beam switch experiment

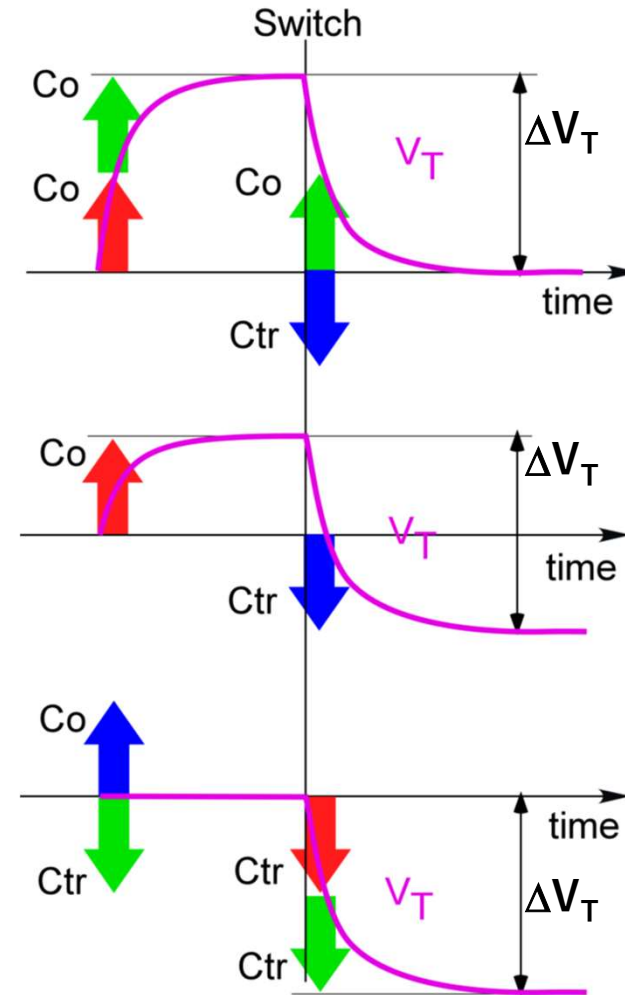
Observations of NBI driven flow = Flow velocity at center

with  
Offset Torque in Co-direction  
**Driven Faster, and then dumped.**

Single beam is switched from  
Co to Counter direction

with  
Offset torque in Counter-direction  
**Driven Faster**

Change of torque input is Identical  
Is  $\Delta V_T$  identical also ?



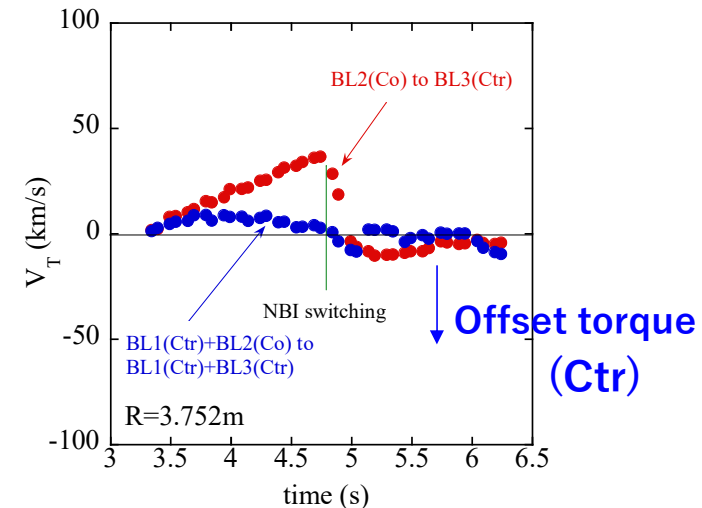
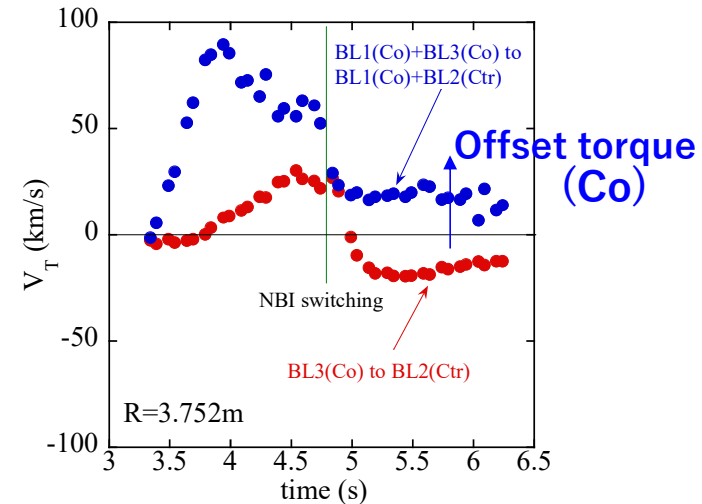
# Time evolution of toroidal flow velocity

The trend of the velocity in time is **almost same for the single beam switching.**

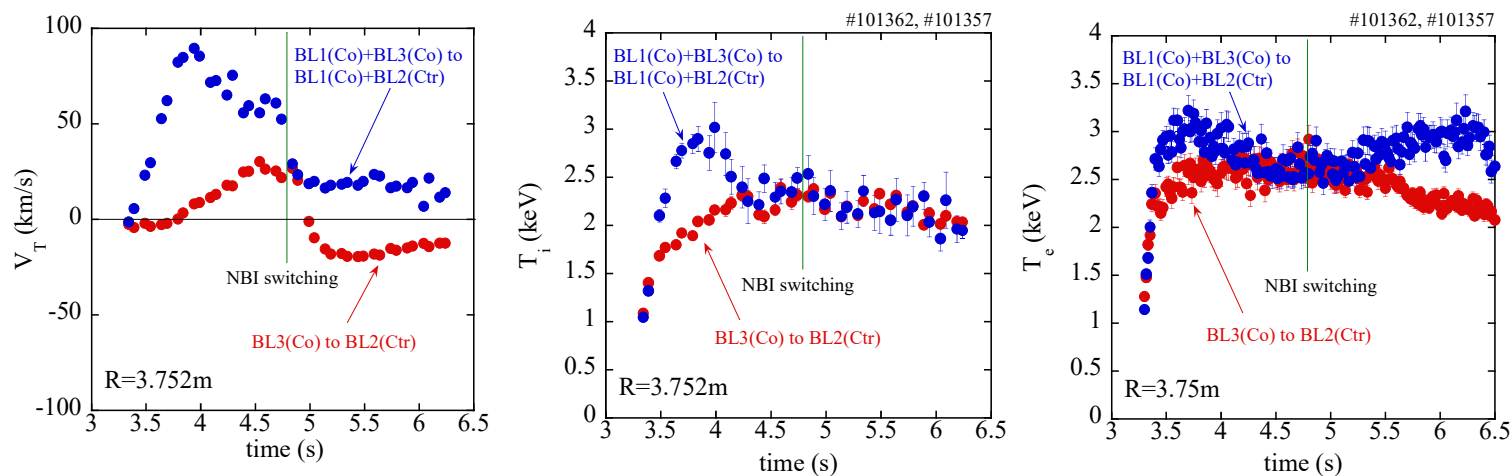
$\Delta V_T$  is **same** except in the case with offset torque to counter.

The change into co direction is too slow compared with the confinement time (a few 100 ms) in the single beam case.

**Large velocity is observed in co direction** while the toroidal flow is **small in counter direction** in the case with offset torque.



# Large flow velocity observed with higher Temperature



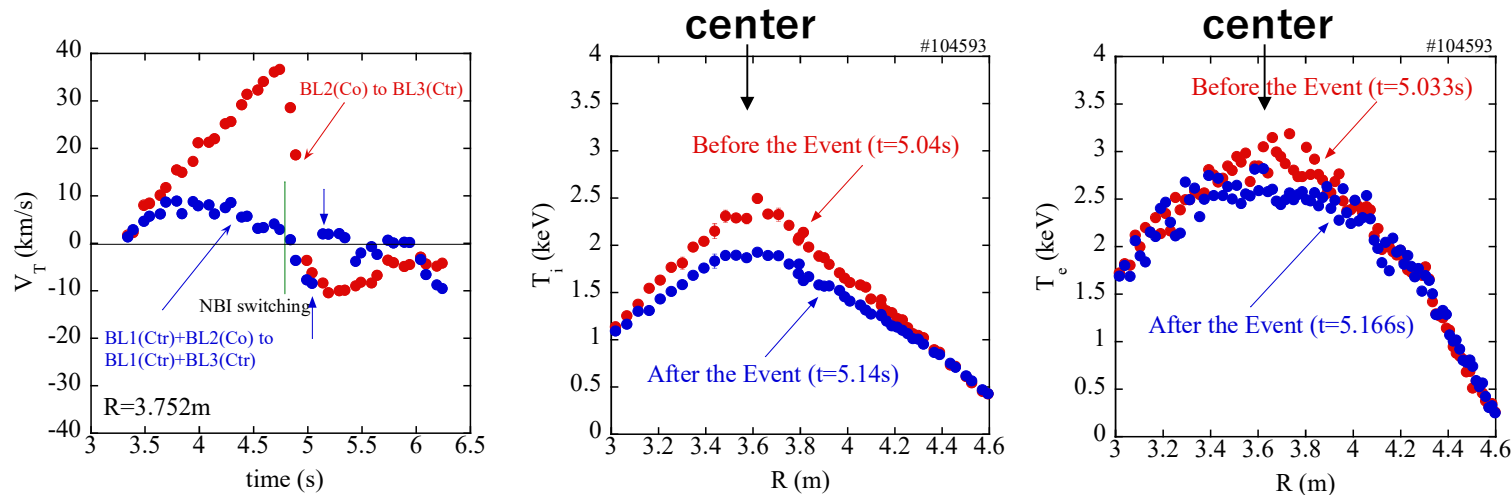
Higher temperature plasma is temporally produced at the time where the large velocity is observed in the case with offset torque injection.

Toroidal flow increases during the higher temperature phase and achieve the larger value than that predicted from the difference in torque input.

温度にともなう流れ成分が観測されている

# Toroidal flow is braked with magnetic structure

The toroidal flow suddenly disappears with offset torque in Counter direction.



Flattened profile is observed both in ion and electron temperature after the event.

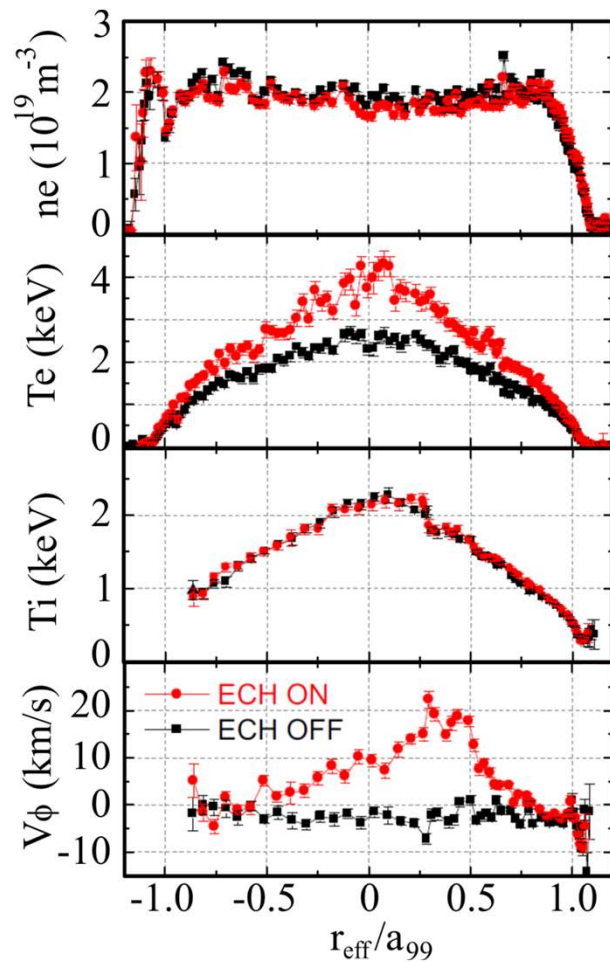


**Magnetic structure affects strongly to the toroidal flow velocity.**

ヒートパルス伝播によって、磁場のストキャスティック化によるトロイダル流のドロップが起きていることが分かった。 K.Ida et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 076032

プラズマの流れは対称な分布にならない場合がある

## ECH印加時の非対称なトロイダル回転分布



ECHを印加による分布の変化

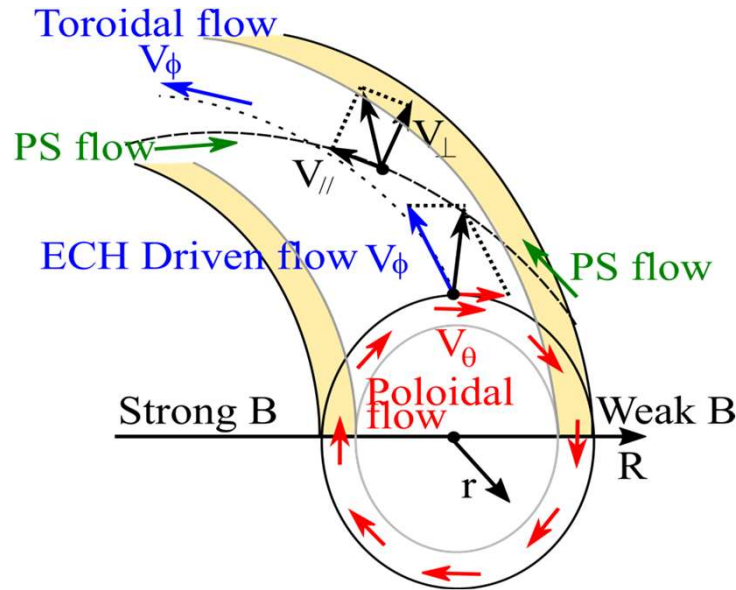
電子密度、電子温度、イオン温度の分布は対称である

ECHを印加するとCo方向の流れが生じる

生じたco方向の流れは、空間的に非対称に分布している

今回、非対称なトロイダル回転速度分布の形成メカニズムがかなり明らかになった

# 非対称な流れ分布を作る候補 Pfirsch-Schlüter flow



非圧縮性があるなら、強磁場側で速く、弱磁場側で遅く流れなくてはならない

径方向電場

$$E_r = -\frac{1}{en_i Z_i} \frac{\partial p_i}{\partial r} - \left( V_\theta B_\phi - V_\phi B_\theta \right)$$

Poloidal flow Toroidal flow

磁気軸より高磁場側(内側  $R < R_{ax}$ )  
 PS flow → counter方向  
 ECH driven flow → co方向  
 打ち消しあう

磁気軸より低磁場側(外側  $R > R_{ax}$ )  
 PS flow → co方向  
 ECH driven flow → co方向  
 強めあう



内側外側に非対称な流れが生じる

$$v_{\text{asym}} = \left( \frac{d\phi}{d\psi} + \frac{1}{Z_i e n_i} \frac{dp_i}{d\psi} \right) C \quad \text{実験}$$

PS flow →  $C = hB$

$h$ は磁場配位形状からくる係数で、以下で定義される。

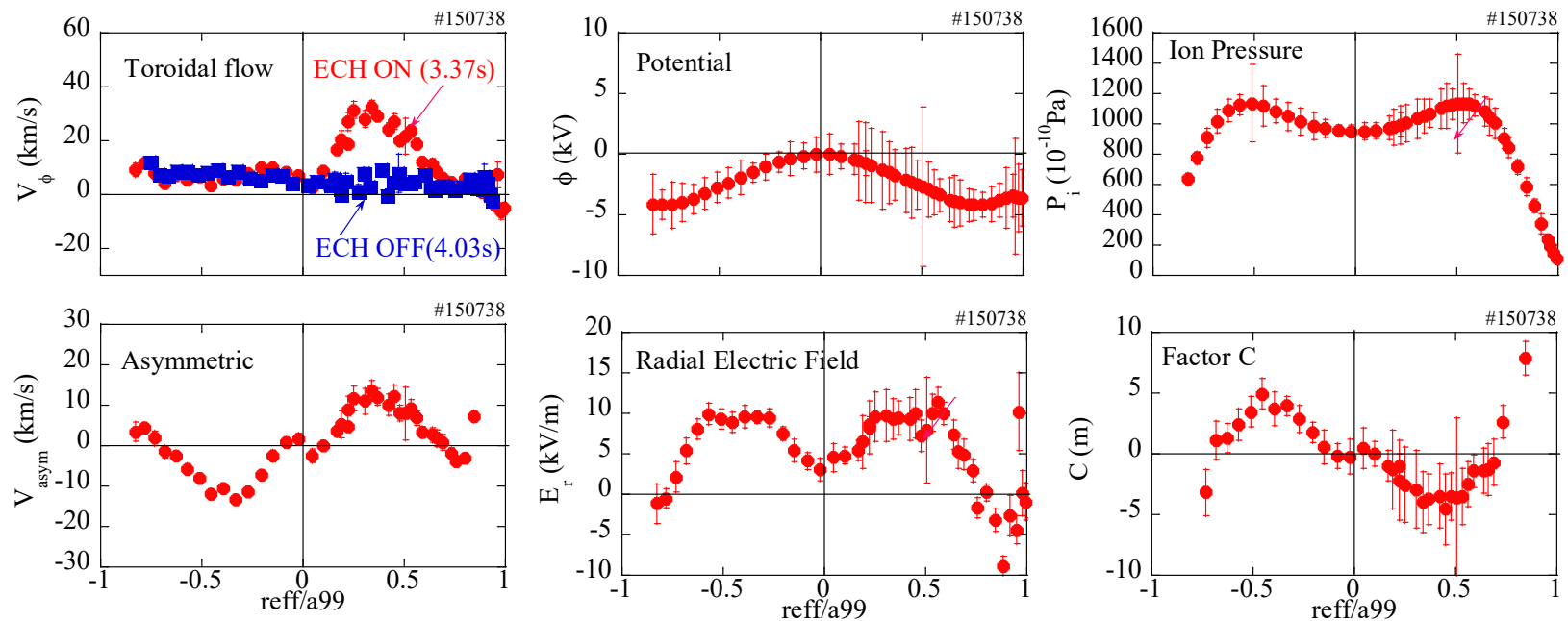
$$\mathbf{B} \cdot \nabla h = -2 \frac{(\mathbf{B} \times \nabla B) \cdot \nabla \psi}{B^3}, \langle h B^2 \rangle = 0. \quad \text{計算}$$



# 実験による係数Cの評価

磁気軸位置3.56m、中心密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の水素プラズマでの観測例

$$v_{\text{asym}} = \left( \frac{d\phi}{d\psi} + \frac{1}{Z_i e n_i} \frac{dP_i}{d\psi} \right) C$$



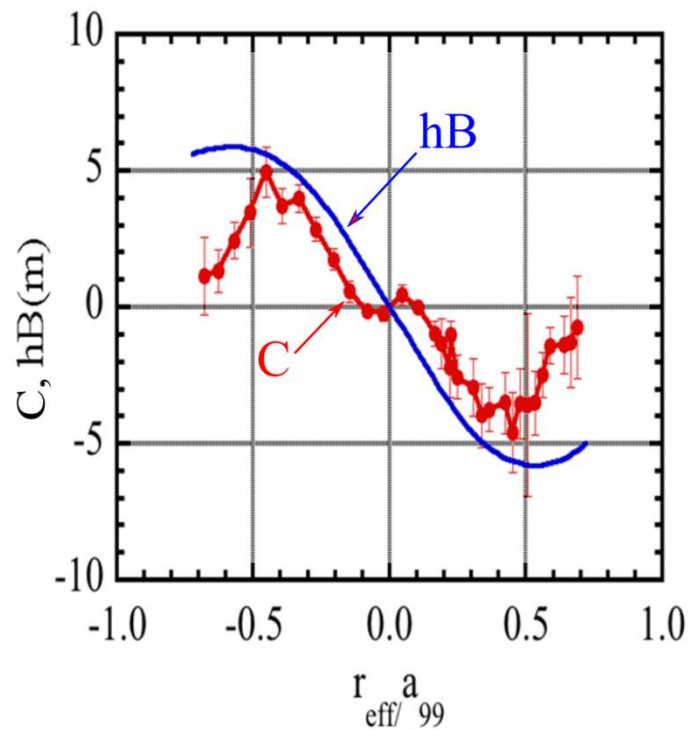
ECHを印加すると非対称な流れが生じる

電位分布が磁気面関数であることを使い、強磁場側の電場分布を得た

非対称な成分がPS流と考えると、電場、イオン圧力分布から係数Cの分布を得た

# 係数CとhBの比較

## Hydrogen

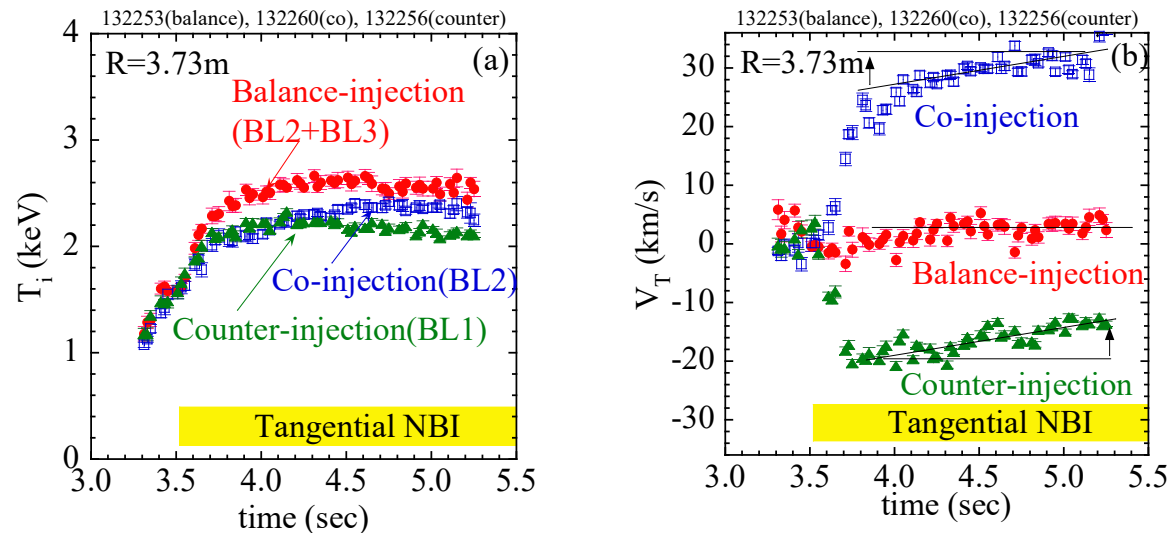


実験的に得られた係数Cの分布と計算によって得られたhBの分布に近いものとなった。

非対称を生む一つの機構としてPS流れが考えられることが分かった

# NBIによる流れは、徐々にCo方向へ変化する

接線ビームを入射する単純な放電での流れ形成



中心部における流れの大きさの変化には2つの時定数がある

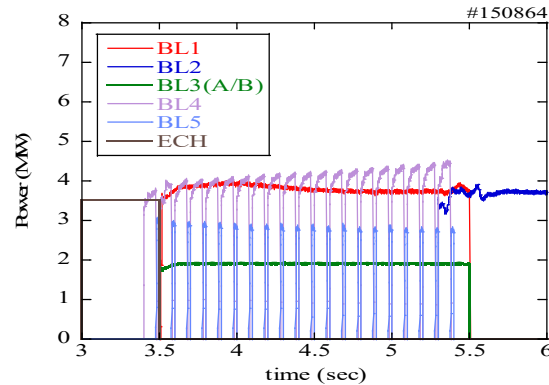
- (1) NBIによる駆動（入射直後に素早く変化）
- (2) 緩やかな時定数での変化（飽和レベルが変化していく）

どちらの場合でも緩やかな変化によってCo方向へと変化していくため、Counter方向にくらべてCo方向に大きな流れが生じる

電流が流れていくことによる影響ではないか？

$R_{ax}=3.6\text{m}$ ,  $B_0=2.75\text{T}$

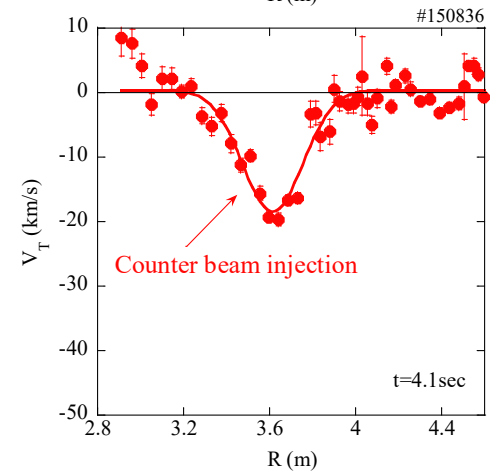
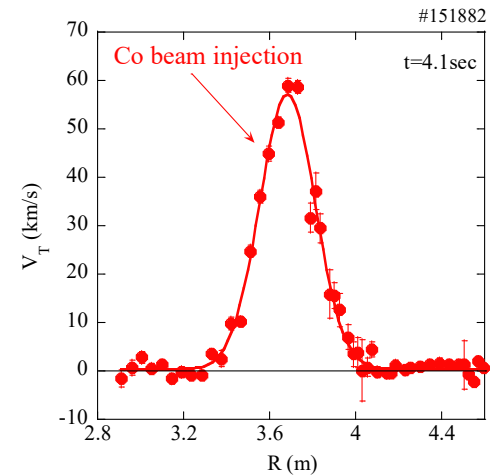
NBIによる流れはco方向が流れやすく、周辺部では流れない



磁気軸位置3.6m の配位での、NBIによる流れの分布

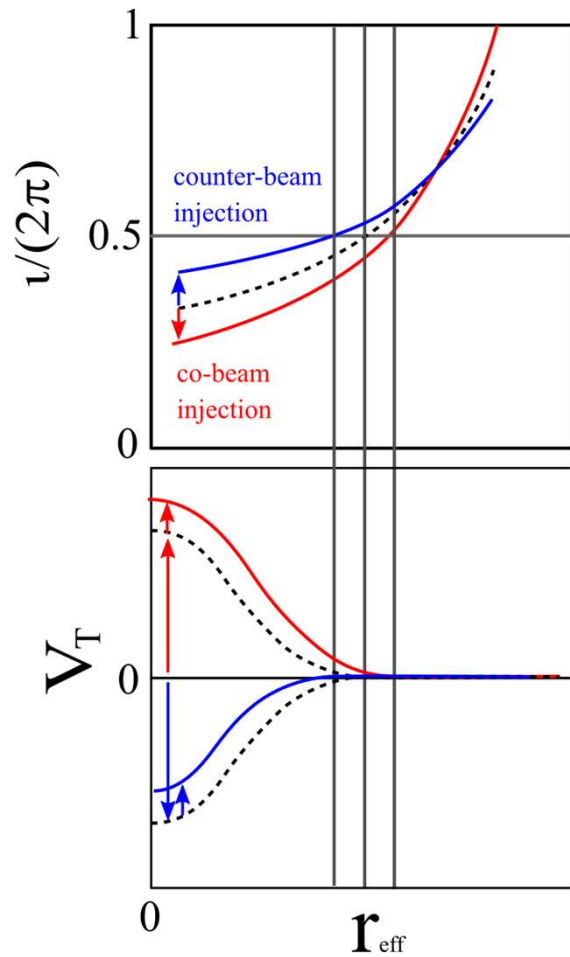
Co方向に流れやすく、Counter方向に流れにくい

ある径方向位置より外側では非常に平坦な分布である



➡ 回転変換分布の変化を観測し、流れの変化と比較する  
フットポイントや有理面位置の変化

## 流れやすさの変化と非対称形成のイメージ

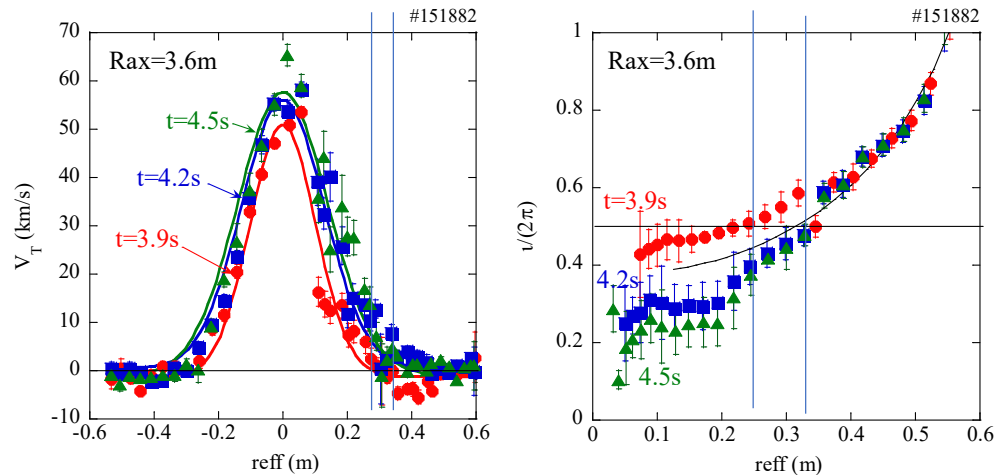


ある回転変換の値より外側では流れにくく、  
その内側で流れが形成される

ある回転変換の増加、減少に伴い流れが生  
じる空間領域が変化し、それに応じて流れ  
の大きさも変化していく

## 回転変換分布の変化とともにフットポイントが変化する

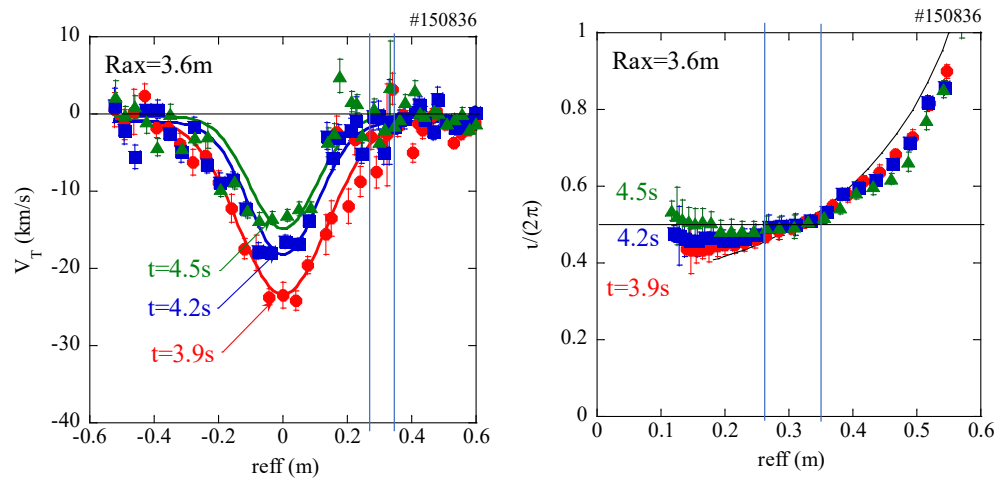
### Co方向入射



中心部の回転変換がCo方向入射では減少し、Counter入射では上昇している

$t/2\pi=0.5$ の外側では、速度分布が平坦になる

### Counter方向入射



流れが生じる幅が狭まると、中心部の速度が減少する。

流れが生じる幅が広がると中心部の速度が増加する。

# 流れの観測

高イオン温度放電での、トロイダル方向の流れの分布はオペレーションからくるNBI駆動の流れと、イオン温度勾配による自発的な流れ、径電場で生じる周辺部の流れなど様々な要素から形成されている。

流れの分布は、磁場構造の影響を受けNBIによって駆動される流れであっても、ストキャスティック時の減衰や、磁気シアの変化による流れの変化などが生じてくる。

ECH入射により磁気軸より内側と外側で非対称な分布が形成されることがある。Pfirsch-Schlüter flowがその流れとして考えられる。

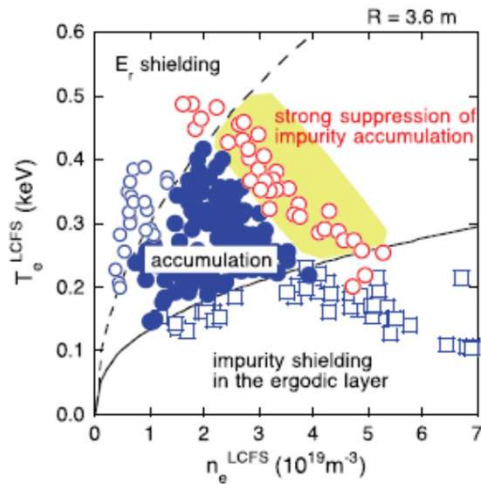
流れが形成されるようなオペレーションによって、流れに影響を与えるパラメータが変化することで流れが変化していく様子が観測される

流れの形成によって、流れが変化するような現象が見つかるだろうか？

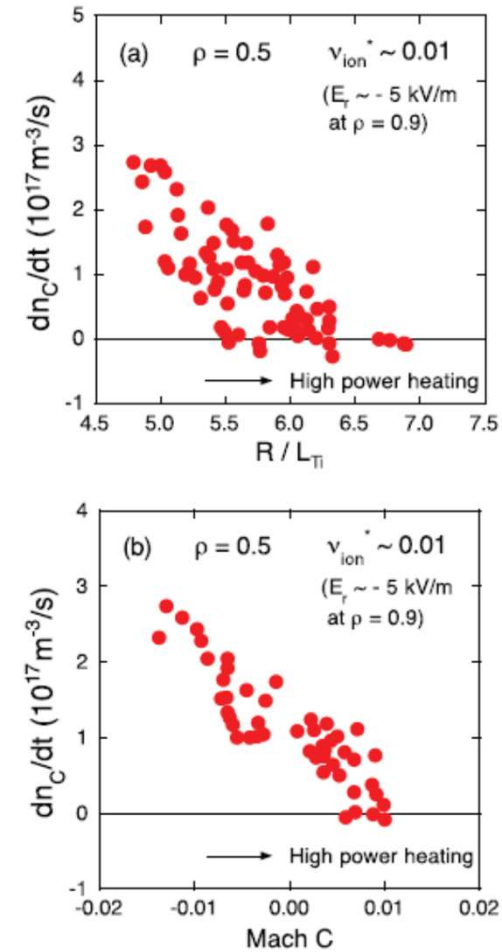
流れが影響を与える現象、流れが影響を受ける現象とは？

# 流れと不純物蓄積

Y. Nakamura et al., "Strong suppression of impurity accumulation in steady-state hydrogen discharges with high power NBI heating on LHD", Nucl. Fusion **57** (2017) 056003



**Figure 4.**  $n$ - $T$  diagram at the plasma edge for impurity behavior in hydrogen discharges with  $R = 3.6$  m. The closed and open blue symbols indicate the discharges ( $P_{\text{nbi}} < 10$  MW) with and without impurity accumulation, respectively. The dashed and solid lines indicate the critical conditions at either side of the impurity accumulation window. The open red points represent the discharges with the strong suppression of impurity accumulation ( $P_{\text{nbi}} = 13$  MW).



**Figure 5.** Dependences of impurity pinch on (a) normalized ion temperature gradient ( $R/L_{Ti}$ ) and (b) carbon Mach number (Mach C) under the constant ion collisionality condition. The impurity pinch is estimated by the increasing rate of carbon density ( $dn_C/dt$ ) at  $\rho = 0.5$ . In these discharges, the  $E_r$  at  $\rho = 0.9$  is negative and around  $-5 \text{ kV m}^{-1}$ .