

# ヘリカルプラズマ中の径電場とトロイダル流形成

核融合科学研究所 吉沼幹朗

1. はじめに
2. ヘリカルプラズマ中の自発的トロイダル流
3. 垂直ビームを用いた荷電交換分光視線
4. NBI駆動によるトロイダル流
5. 径電場により駆動される自発的トロイダル流
7. イオン温度分布計測と不純物ホール
8. まとめ

# はじめに

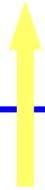
径電場および径電場シア

ポロイダル回転(ExB)

プラズマ中の流れ

異常輸送(乱流)の抑制

強い速度シアは不安定性を引き起こす



トロイダル回転

自発的

NBI駆動

ヘリカルプラズマ中での流れの形成過程やその閉じ込め改善への影響を調べていく

LHDにおいて

新古典拡散の変化による電場制御

荷電交換分光計測によるトロイダル回転計測、ポロイダル回転計測

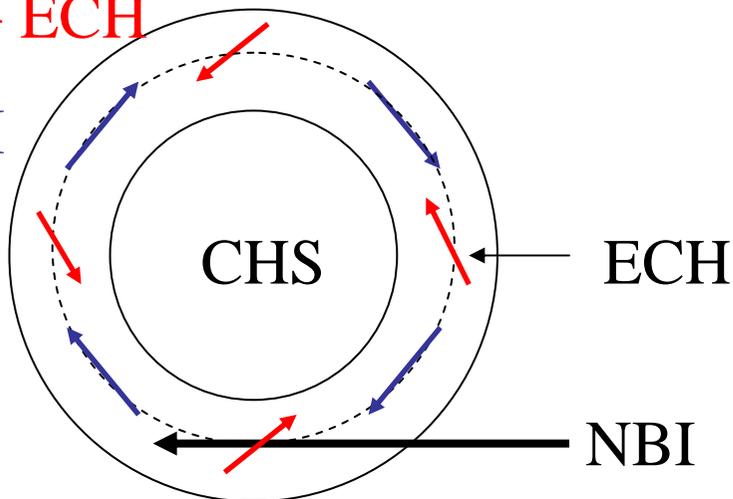
径電場により駆動されるトロイダル流と、NBI駆動のトロイダル流の観測

トロイダル視線によって中心領域までのイオン温度分布計測が可能となった

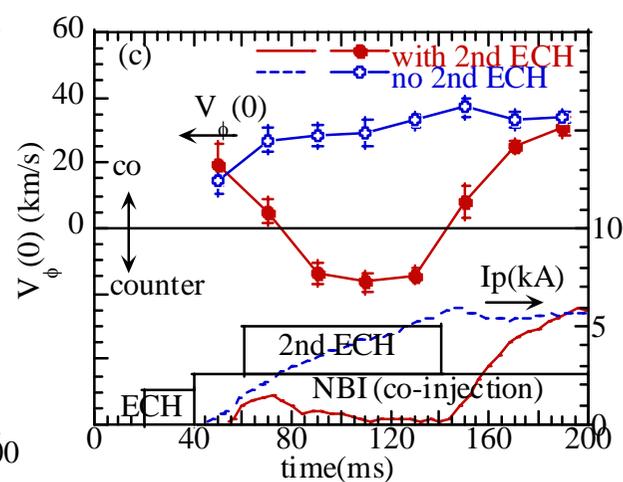
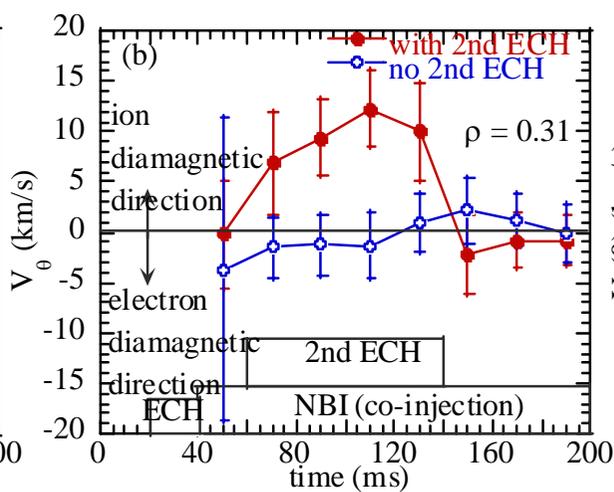
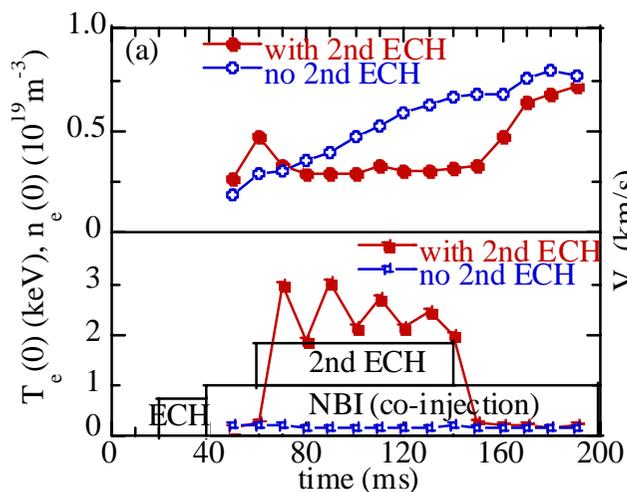
# CHSでの電場とトロイダルフロー

NBI + ECH

NBI

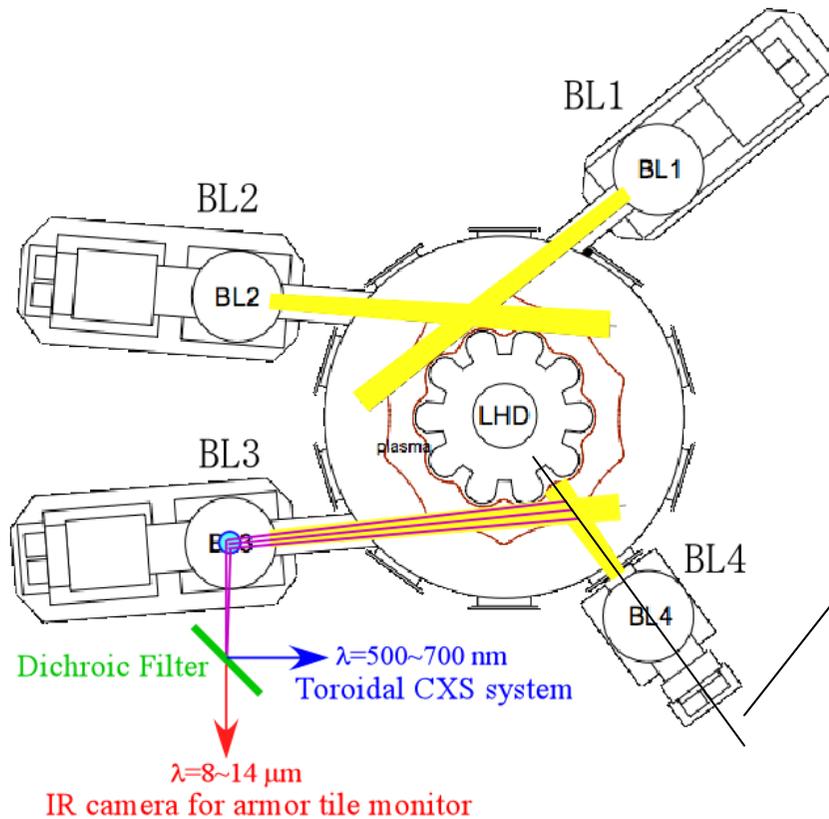


CHSにおいてECHによる  
Hot Electron mode の放  
電中で自発的なトロイダ  
ル回転が観測された  
[PRL 86(2001)3040]

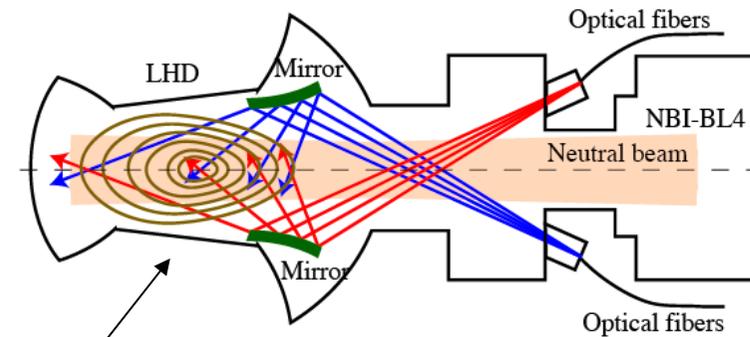


# 荷電交換分光計測の視線

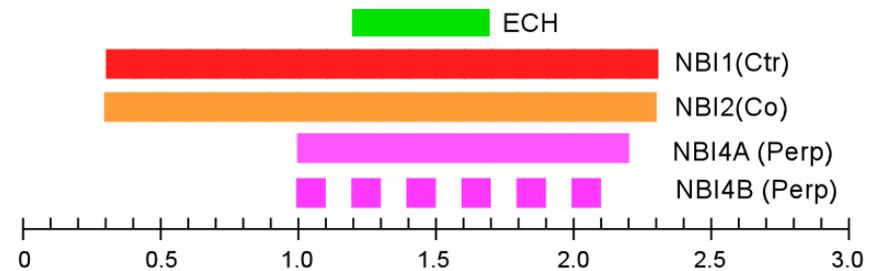
トロイダル視線



ポロイダル視線



CXS計測での典型的放電パターン



40keV 垂直入射NBI

垂直入射NBI4は、100msec ON、100msec OFF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

# NBI入射によるトロイダル流

外部から運動量を入力することによるトロイダル流

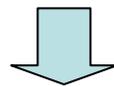
NBIを切り替えて、Co入射の場合、Ctr入射の場合、Balance入射の場合でのトロイダル回転分布を調べた

中心近傍が駆動されやすい

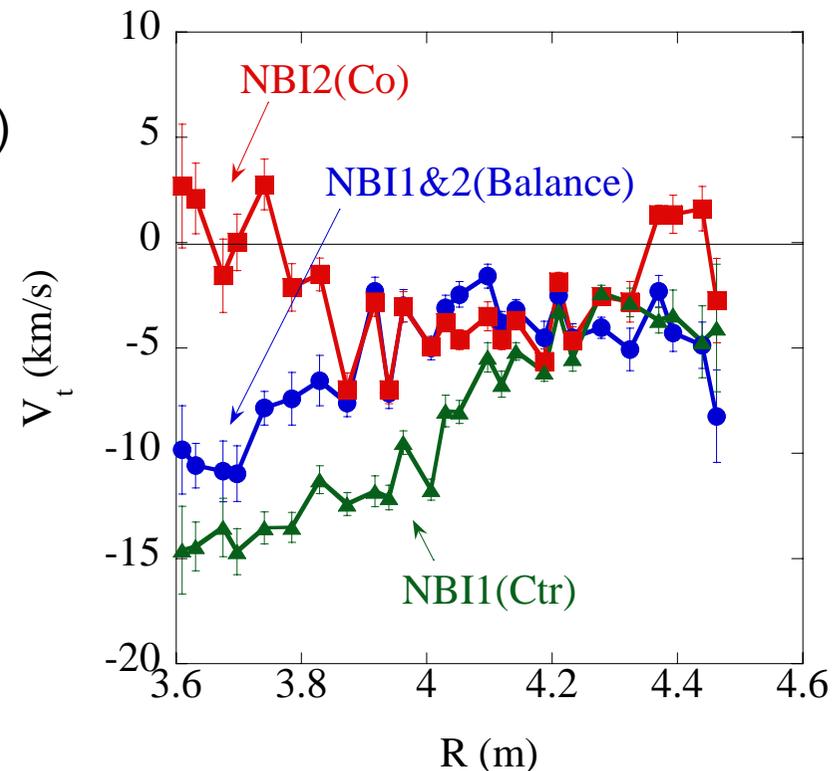
Co入射(NBI2)では中心の狭い範囲( $R < 3.9\text{m}$ )

Ctr入射(NBI1)ではより広い範囲( $R < 4.1\text{m}$ )

周辺部ではNBIによるトロイダル回転は駆動されにくい



周辺部ではヘリカルリップルが強くなるために、駆動されにくいと考えている



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

75488,75489,75493

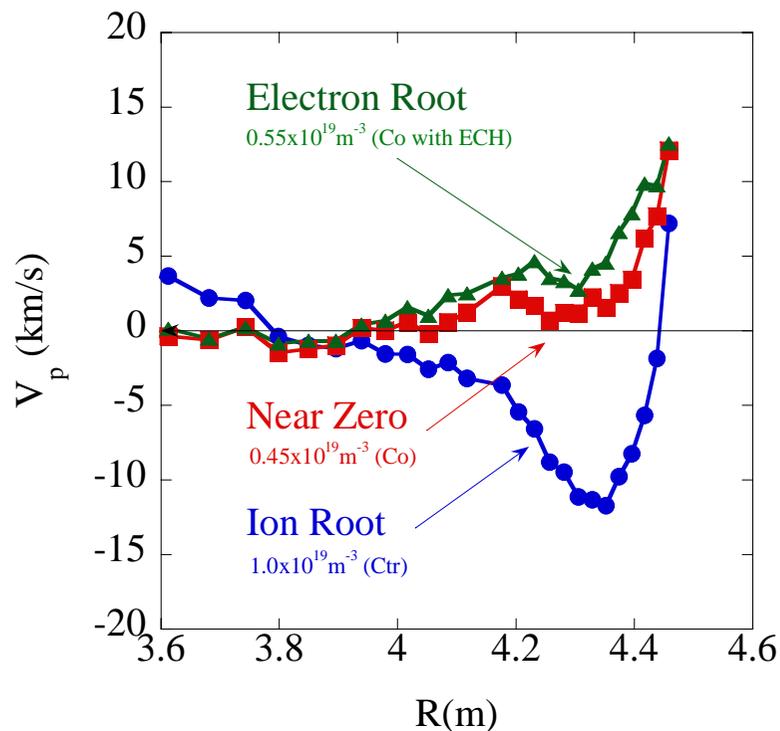
# 電場とトロイダル回転

密度および加熱入力を変えることで、周辺部で電子ルート、イオンルートになるプラズマを生成  
周辺部でのポロイダル回転の変化に伴い、トロイダル回転が変化している。

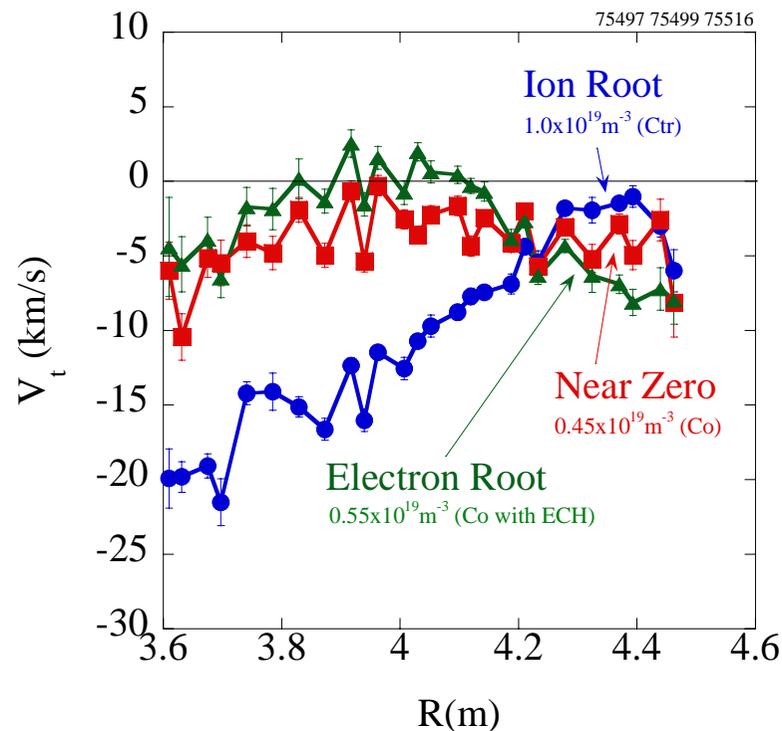
$V_p < 0$  (イオンルート)  $\Rightarrow$   $V_t$  Co方向(正)へ

$V_p > 0$  (電子ルート)  $\Rightarrow$   $V_t$  Ctr方向(正)へ

ポロイダル回転分布



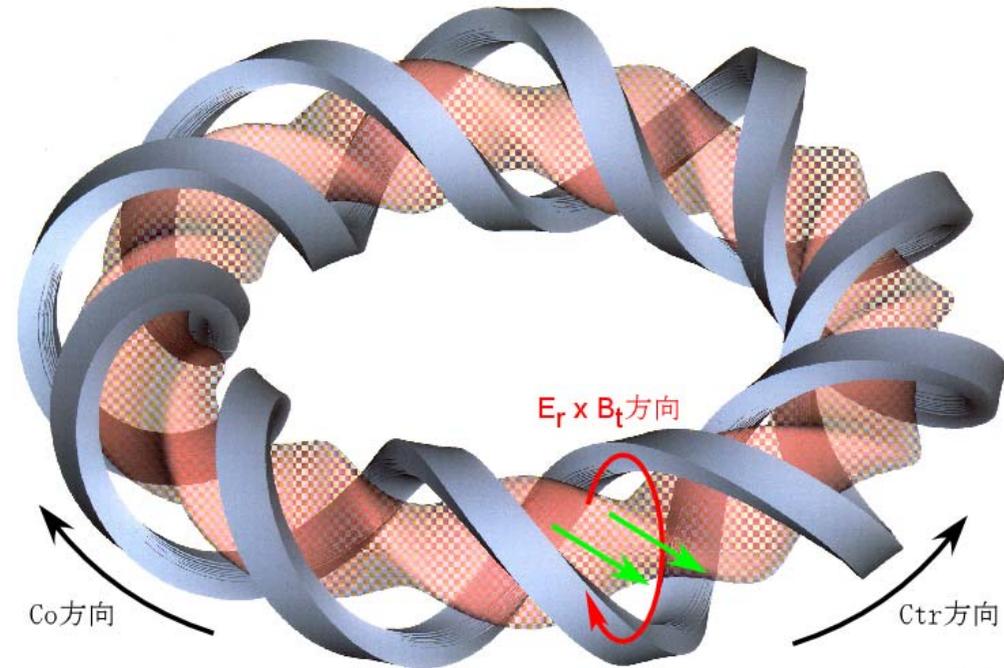
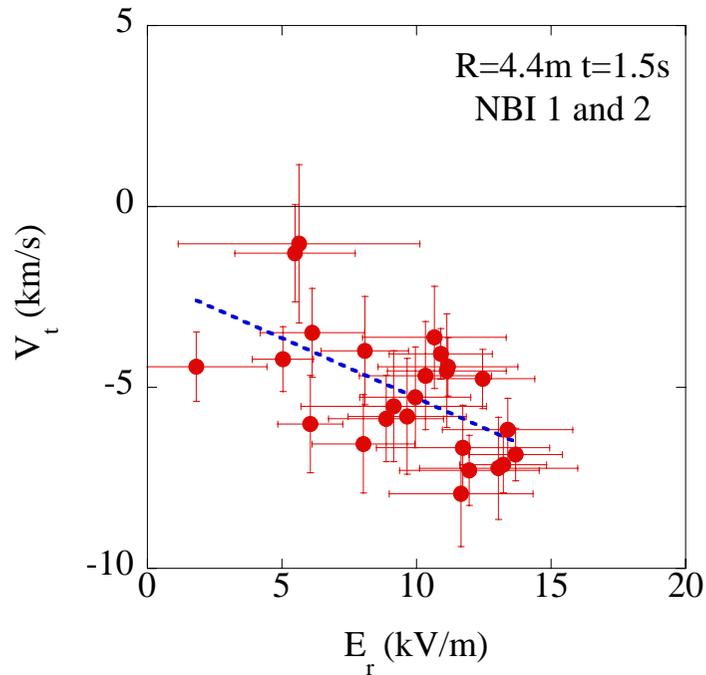
トロイダル回転分布



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

# 電場とトロイダル回転

ビーム入射条件が同じショットを選び、電場とトロイダル回転の関係をプロット



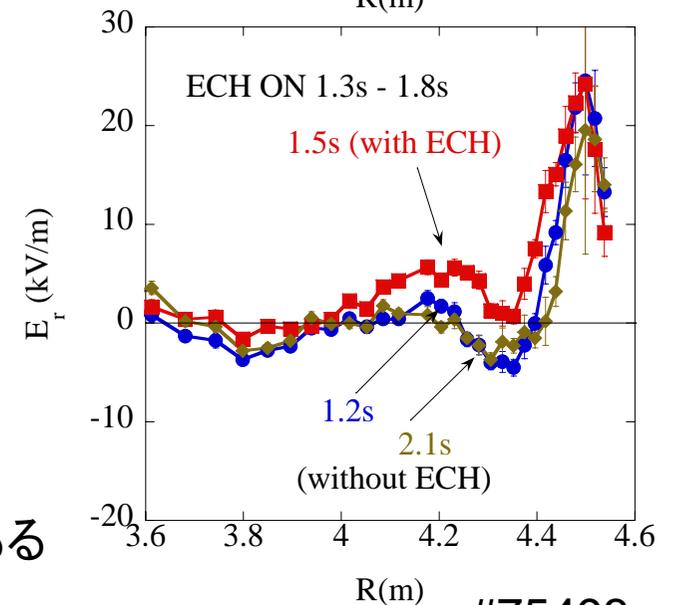
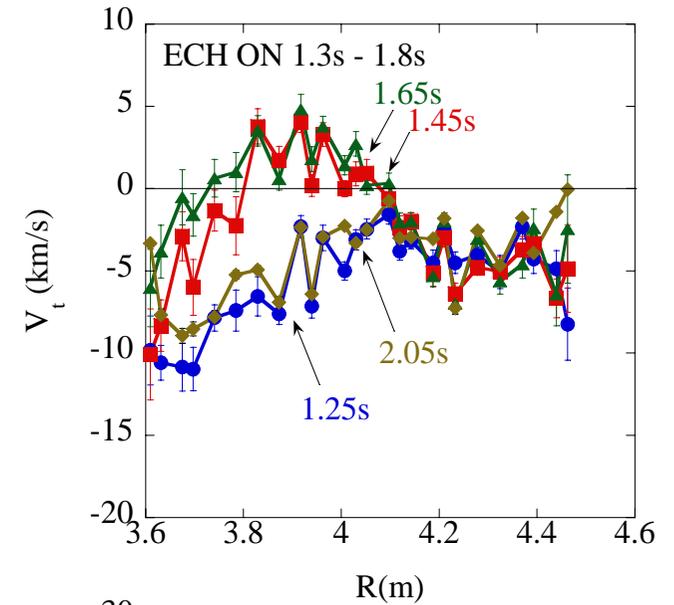
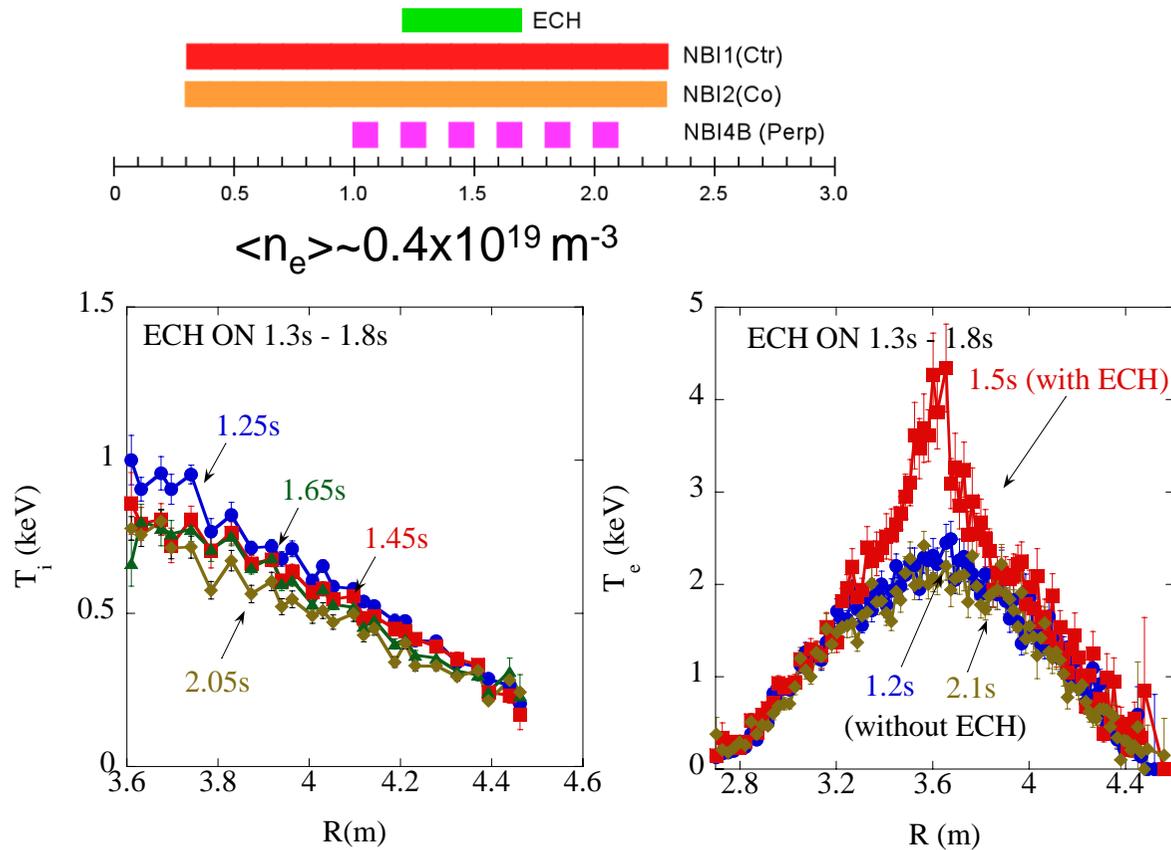
NIFS-PE195

$$\Delta E_r = 15 \text{ kV/m} \Rightarrow \Delta V_t = 5 \text{ km/s}$$

電子ルート(正電場)で、Ctr方向のトロイダル回転が駆動される。

径電場により駆動されるポロイダル流がヘリカルピッチの方向(磁場強度の変化が少ない流れやすい方向)に沿おうとすることでトロイダル方向へ向きを変えられる

# ECH入射によるトロイダル流駆動



中心部においてCo方向に回転する( $\Delta V_t \sim 10$  km/s)  
 電場は、ECH入射によって周辺部でわずかに変化  
 $T_i$ 分布にはほとんど変化が観られない

⇒  $T_e$ の上昇とCo方向への回転駆動に関係があるようである

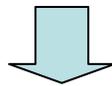
$B_t = 1.5\text{T}$   $R_{ax} = 3.6\text{m}$   $\gamma = 1.174$   $Bq = 100\%$

#75493

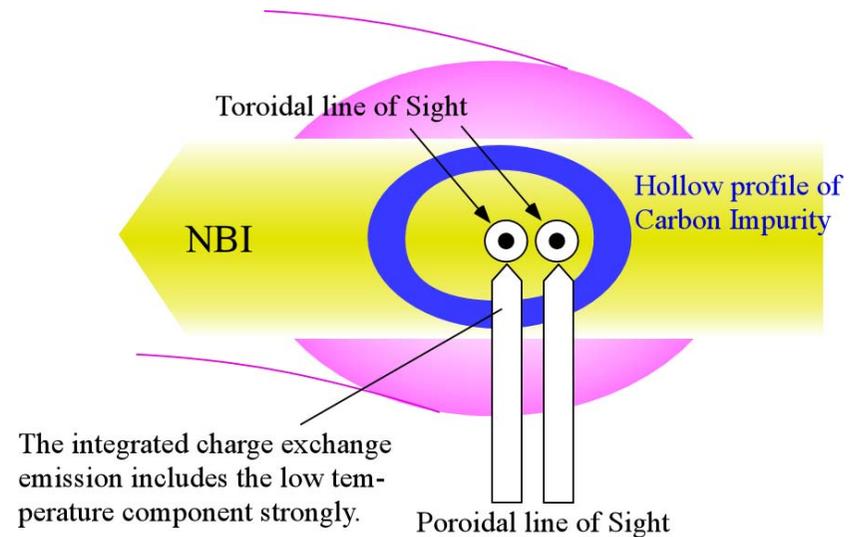
# 接線視線を用いたイオン温度分布計測

ヘリカルプラズマでは、高温領域では、中心部が正電場になることで不純物が吐き出されホローな不純物分布になることが予測される。

垂直視線の荷電交換分光計測では、積分効果によって周辺部からの発光が強くなり中心領域のイオン温度計測が困難になる。



接線視線を用いて、高イオン温度での分布計測を行う



不純物分布がホローになった場合でも、接線視線の荷電交換分光計測なら中心のパラメータを計測できる

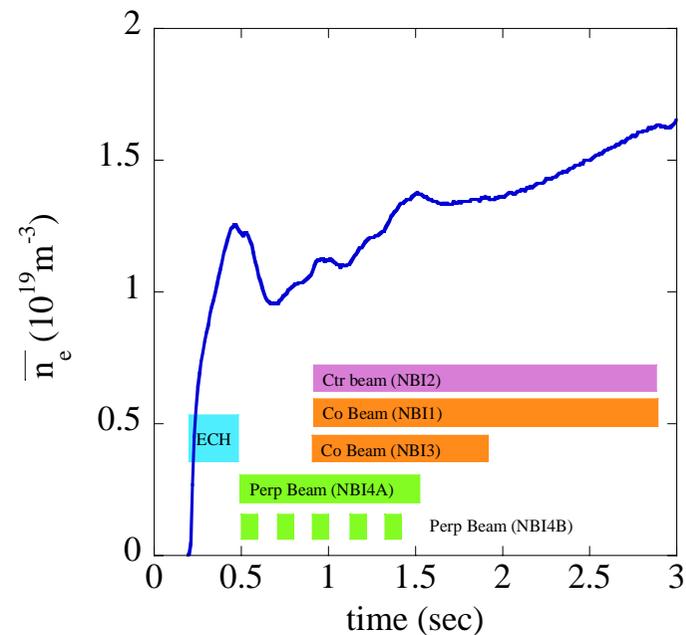
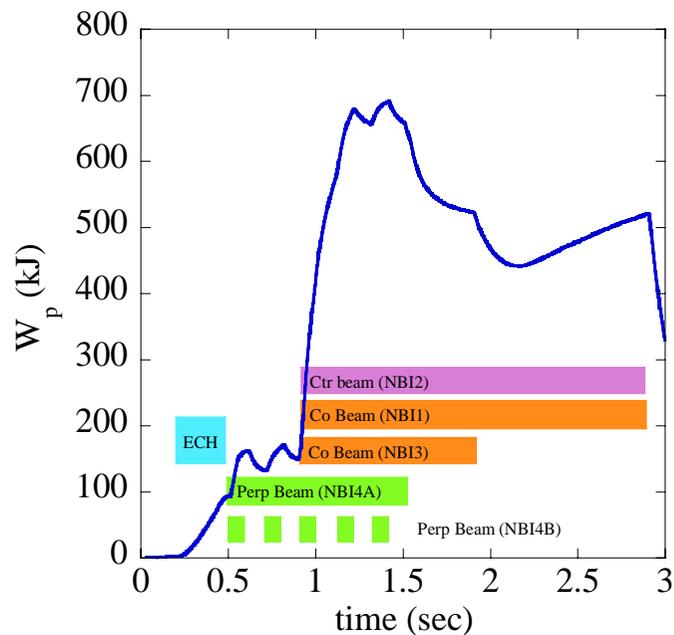
# 高イオン温度の放電

LHDの垂直入射NBIは、ピークの密度分布を形成する傾向にある  
ピークした密度分布であると接線ビームの吸収がよいと考えられるため、垂直ビームを  
先行させた放電を行った。

垂直NBIはNBI4Bを計測ビームとして、100msec ON, 100msec OFFの変調を行った。加熱ビーム  
としてNBI4Aを1s連続で入射している。

垂直入射入射NBIが入射されている時間での線平均電子密度は およそ $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

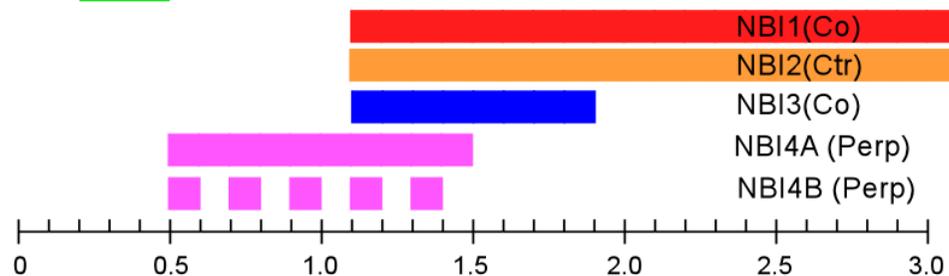
蓄積エネルギーは接線NBIを入射した後に670 kJまで上昇



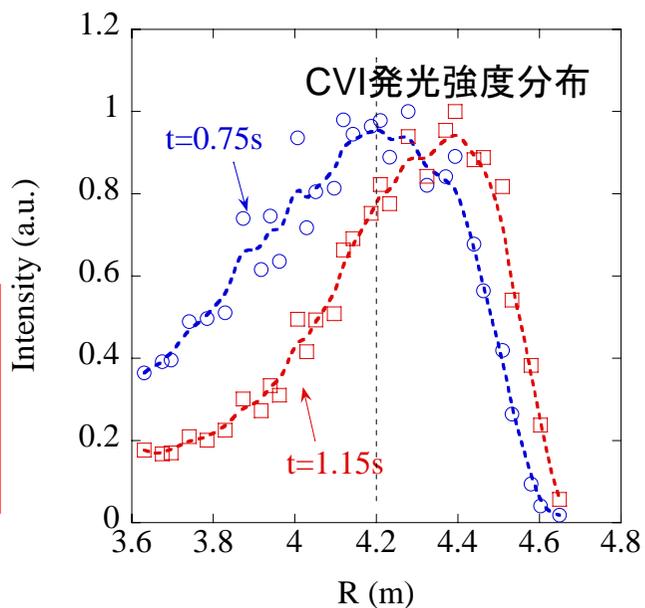
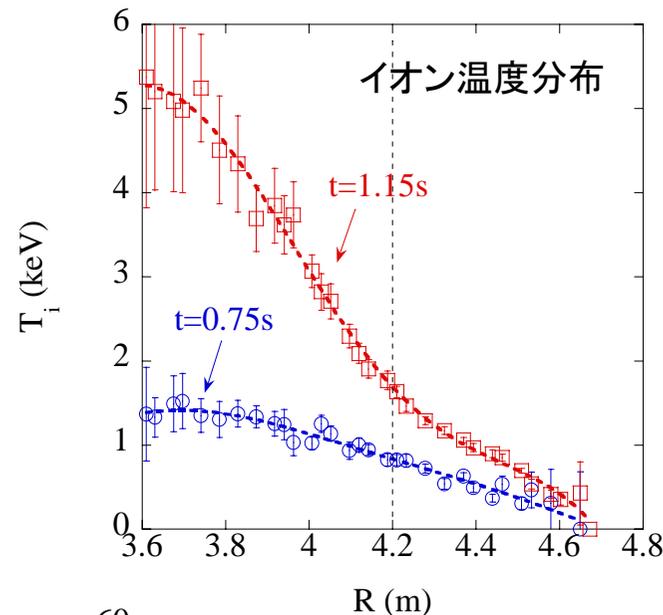
# Co入射でのイオン温度分布

$B_t = -2.769T$   $R_{ax} = 3.575m$   $\gamma = 1.254$   $Bq = 100\%$

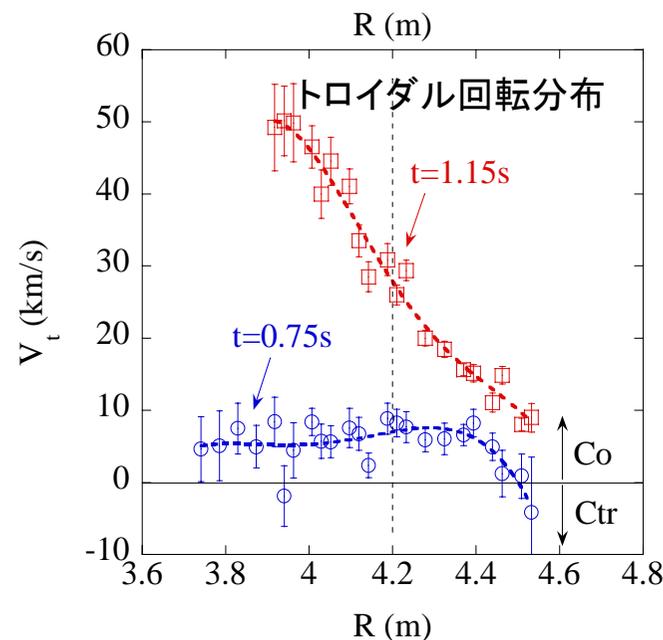
ECH



Hプラズマ、電子密度が $n_e \sim 1 \times 10^{19} m^{-3}$ の領域で、5keV程度の高イオン温度放電が達成された。

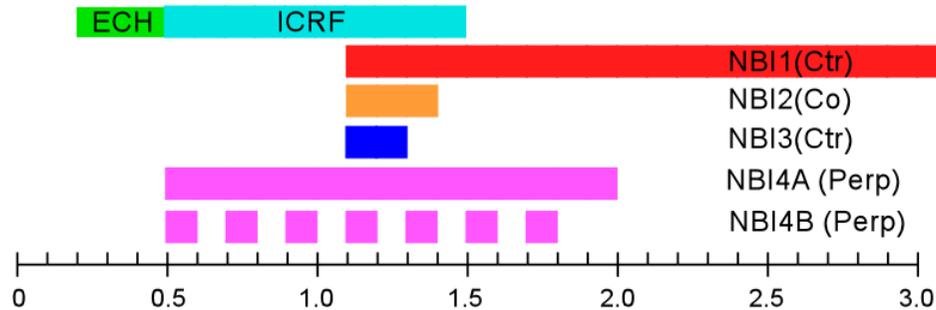


炭素不純物の荷電交換発光強度分布は、イオン温度が高くなると、中心部から吐き出される。

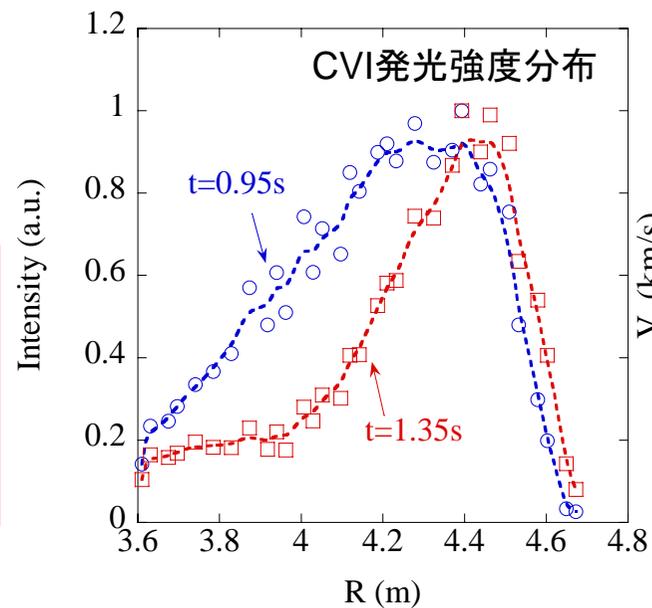
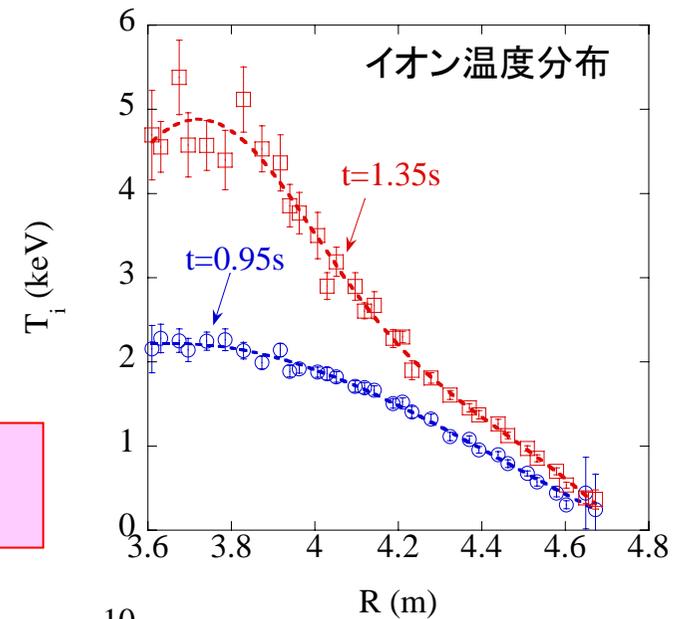


# Ctr入射でのイオン温度分布

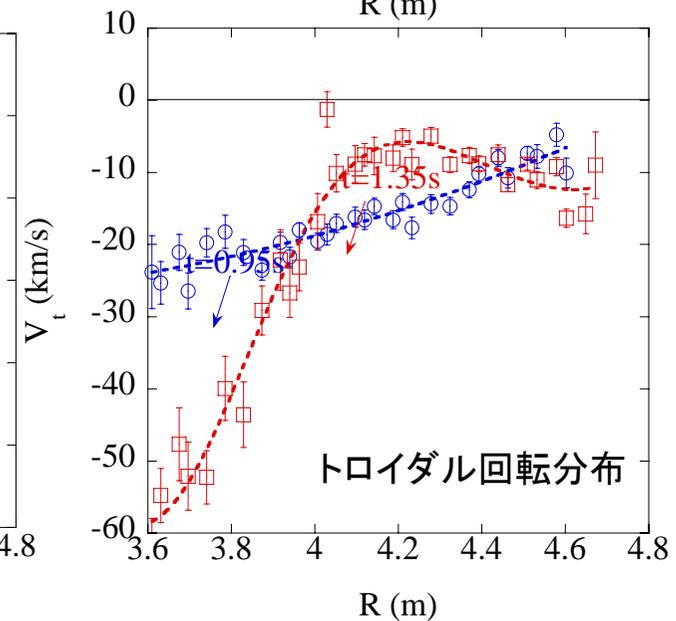
$B_t=2.85T$   $R_{ax}=3.6m$   $\gamma=1.254$   $Bq=100\%$



Heプラズマ、電子密度が $n_e \sim 1.5 \times 10^{19} m^{-3}$ の領域で、4.5keV程度の高イオン温度放電が達成された。



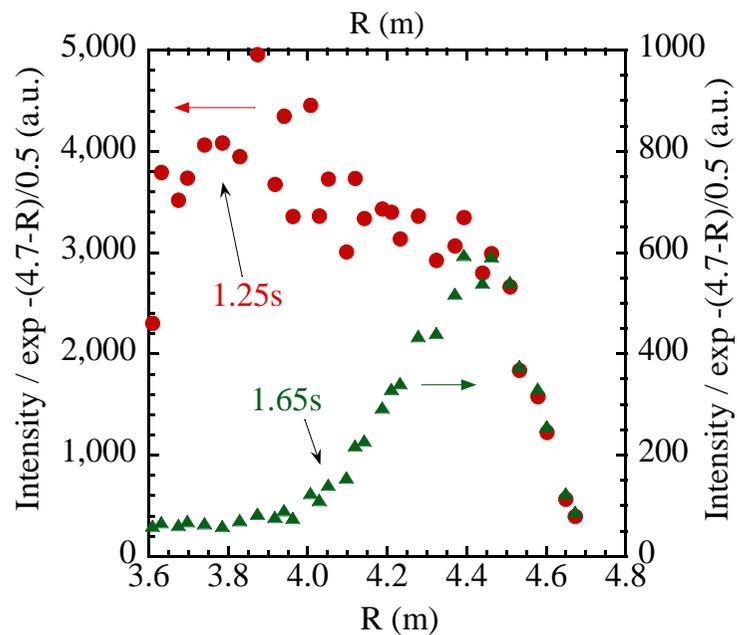
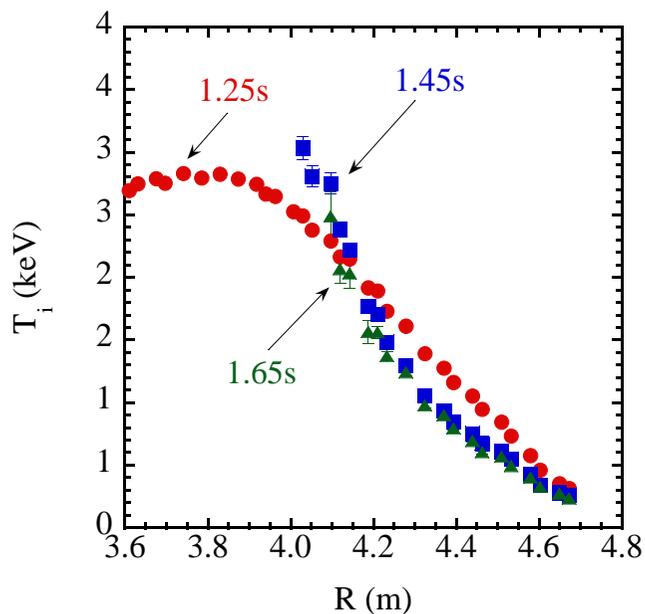
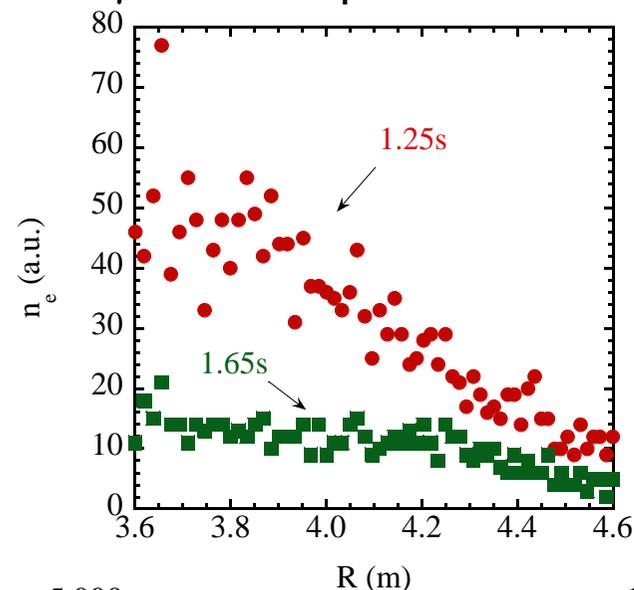
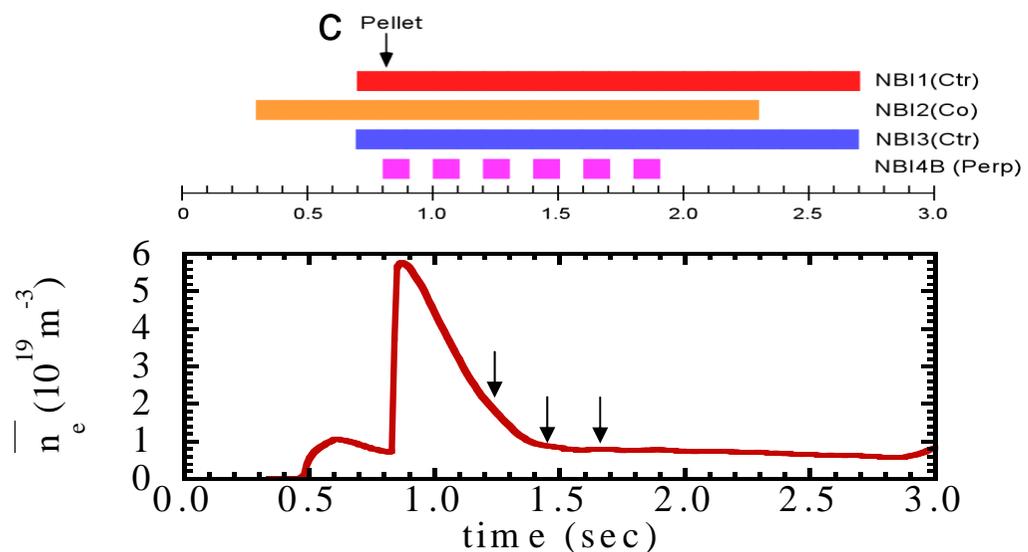
中心部で強いトロイダル回転が観測された。トロイダル回転の向きは、NBIの入射方向と一致する。



75235

# 不純物ホール

High Z 放電を用いた高Ti実験  $B_t = -2.676\text{T}$   $R_{ax} = 3.7\text{m}$   $\gamma = 1.254$   $Bq = 100\%$



不純物が中心から吐き出され極端にホールな不純物分布になることが観測された。

# まとめ

---

---

- 接線視線からの荷電交換分光計測によってヘリカルプラズマ中のトロイダル回転分布およびイオン温度分布計測を行った。
- NBIによって駆動されるトロイダル回転は、中心近傍において駆動されやすく、周辺部では駆動されにくい。ヘリカルリップルが周辺部で強くなるためであると考えている。
- 周辺部において径電場が負から正に変化することにしたが、Ctr方向へのトロイダル回転が形成される現象が観測された。
- ECH入射によっても中心部にCo方向のトロイダル回転が駆動されることが観測された。電子温度の上昇との関係はこれからの課題である。
- NBI入射の最適化によって電子密度が $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の領域で5keV程度のイオン温度が達成された。同時に、プラズマ中心部にNBIの入射方向に依存した強いトロイダル回転が駆動されている。
- イオン温度の上昇に伴い、不純物の分布が極端にホローになる不純物ホールが観測された。