

# ヘリオトロンJにおけるトロイダル電流の研究

京大エネ科,京大エネ理工研<sup>A)</sup>,核融合研<sup>B)</sup>

本島巖,岡田浩之<sup>A)</sup>,中村祐司,渡邊清政<sup>B)</sup>,鈴木康浩,長崎百伸<sup>A)</sup>,  
水内亨<sup>A)</sup>,近藤克己,花谷清<sup>A)</sup>,小林進二<sup>A)</sup>,山本聡<sup>A)</sup>,鳥居祐樹<sup>A)</sup>,  
金子昌司,有本元,荒川純,嶋崎伸秀,大橋佳祐,東貴久,  
菊竹正晃,濱上崇史,山崎久路,山田雅毅,佐野史道<sup>A)</sup>

Study of Toroidal Current in Heliotron J

GSES Kyoto Univ.,IAE Kyoto Univ.<sup>A)</sup>,NIFS<sup>B)</sup>

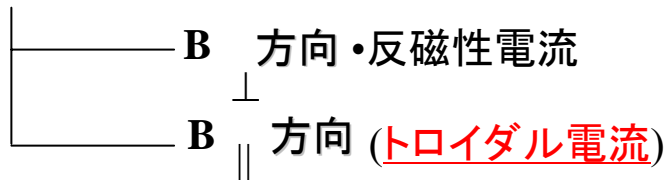
G.Motojima,H.Okada<sup>A)</sup>,Y.Nakamura,K.Y.Watanabe<sup>B)</sup>,et al.

内容:

- 1.背景と目的
- 2.ブートストラップ電流の基礎的挙動
- 3.数値計算
- 4.実験結果
- 5.まとめ
- 6.今後の課題

環状プラズマにおけるトロイダル電流は運転領域やMHD平衡・安定性を変化させる可能性があり、トロイダル電流制御は閉じ込め磁場生成にトロイダル電流を必要としないヘリカル装置においても重要であると考えられている。それは、トロイダル電流としてブートストラップ(BS)電流等の非誘導電流がヘリカル装置でも流れることが確認されているためである。

プラズマ中に流れる電流



□磁気面平均すれば消える電流

•Pfirsch-Schluter電流

□磁気面平均しても残る正味電流

•オーミック電流

•中性粒子ビーム駆動電流(大河電流)

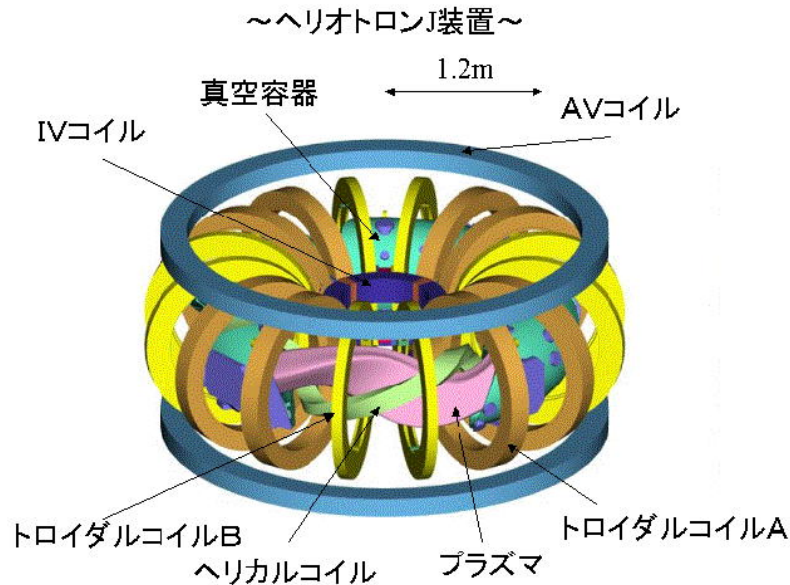
•RF入射による駆動電流(電子サイクロトロン駆動電流等)

•ブートストラップ電流(BS電流) ←荷電粒子が磁気ミラーに捕捉されることで誘起される。

# 目的

- トロイダル電流を制御するために、電流機構を解明する必要がある。
- トロイダル電流の一つであるブートストラップ電流は**磁場配位**や**圧力勾配**に**大きく依存**する。そして、ヘリカル装置の特徴である磁場配位の自由度によって制御が可能である。
- ヘリオトロンJは配位の可変性を持っており、ブートストラップ電流に対して磁場のスペクトル成分(トロイディシティ、ヘリシティ、**バンピネス**)がなす役割について調べることができる独自の特徴をもった装置であり、磁場配位のブートストラップ電流に与える影響について詳細に、精度よく研究することができる。
- バンピー成分はブートストラップ電流の大きさ、向きに大きな影響を与える。よってトロイダル電流制御の一つの手段となりうる。
- そのような利点を活かし、本研究では磁場のバンピー成分のみを選択的に変化させたときのトロイダル電流変化を理論的、実験的に研究し、ヘリカル系におけるトロイダル電流の挙動を明らかにすることを目的とする。

# ヘリオトロンJ装置



プラズマ平均大半径: 1.2 [m]

プラズマ平均小半径: 0.1 ~ 0.2 [m]

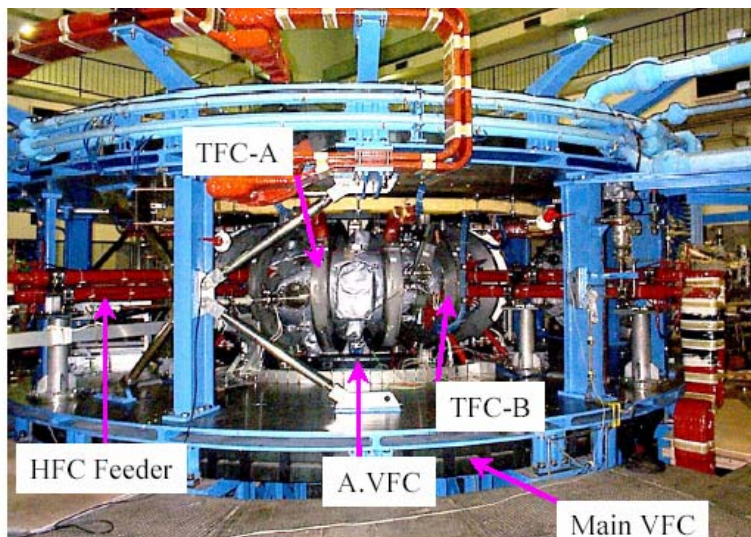
磁場配位:

M=4, L=1 ヘリカル軸ヘリオトロン配位

磁気軸位置での最大磁場強度: 1.5 [T]

回転変換: 0.3 ~ 0.8

磁気井戸: 1 ~ 2 %



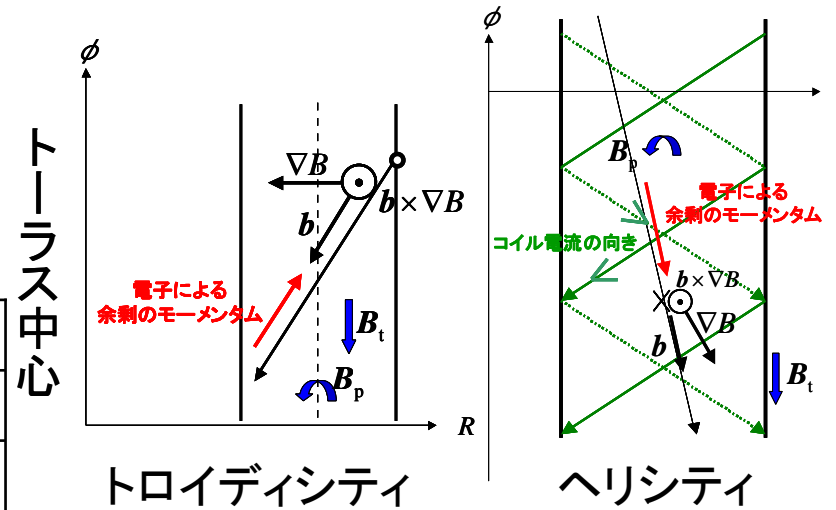
# 捕捉粒子によるブーツトラップ電流の生成

- トロイディシティ、ヘリシティ、バンピネスなどの磁場の勾配( $\nabla B$ )がある。⇒ 捕捉(バナナ)粒子が生まれる。
- 圧力勾配(密度、温度)勾配がある。



磁力線方向に電流が生成(BS電流)。

	BS電流の方向
トロイディシティ	磁場と同方向
ヘリシティ	磁場と逆方向
バンピネス	どちらも可



$$j_{bs}(r) = -\mu G_{bs} \frac{d\beta}{dr}$$

$j_{bs}$ : BS電流密度、 $\mu$ : 粘性係数、  
 $G_{bs}$ : 形状因子、 $d\beta/dr$ : 圧力勾配

- ヘリオトロンJはトロイディシティもヘリシティもバンピネスも持ち、それらに対して可変性があるので、配位によってBS電流の流れ方を変化させることができる。⇒ 電流挙動の理解。
- ヘリオトロンJ装置では、基本的にはヘリシティが作る方向(磁力線と逆向き)にブーツトラップ電流は流れる。



# 数値計算方法

## ブートストラップ電流のバンピー成分の依存性の検証

2種のトロイダルコイル(TA, TB Coil)電流比を変化させ、磁場のバンピー成分のみを変化させた時のブートストラップ電流を計算した。数値計算には新古典理論に基づく計算コード(SPASCコード[1])を用いた。

回転変換と磁気井戸の径方向分布を一定にして配位を決定。**KMAG**(磁力線追跡コード)

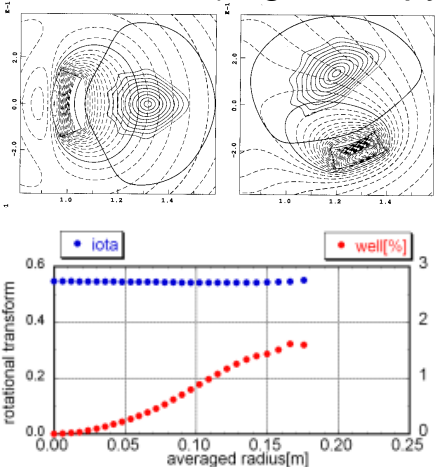
MHD平衡計算  
**VMEC2000**(3D平衡解析コード)

形状因子、ブートストラップ電流を計算  
**SPASC**

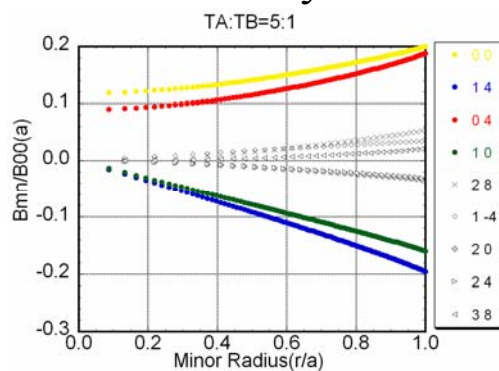
繰り返す

矛盾のないブートストラップ電流を含んだ3D-MHD平衡

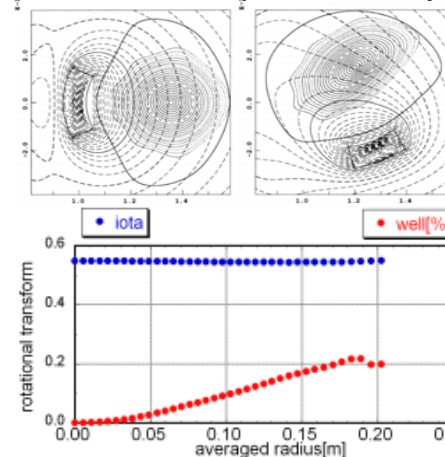
TA:TB=5:1(High Bumpy)



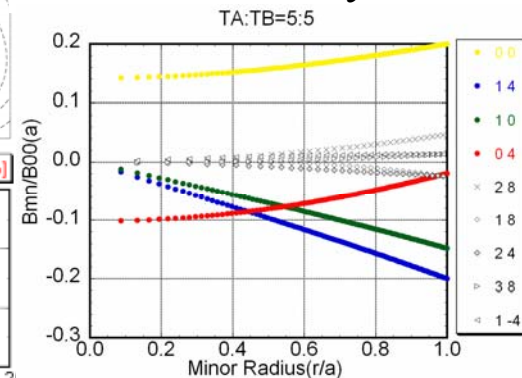
— bumpiness  
— toroidicity  
— helicity



TA:TB=5:5(Low Bumpy)

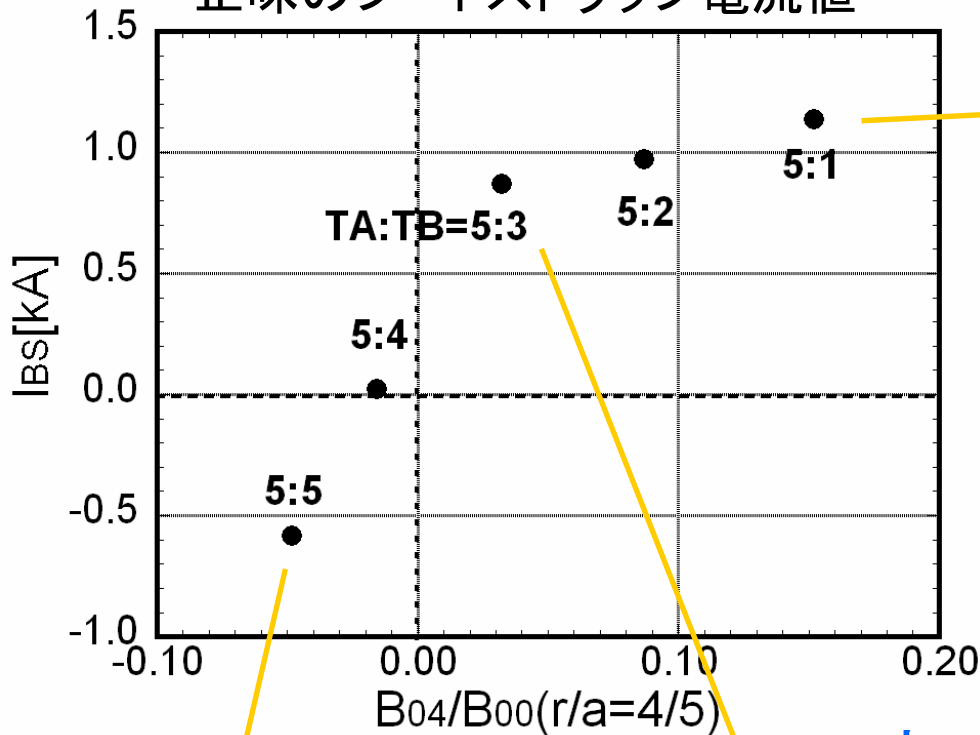


— bumpiness  
— toroidicity  
— helicity



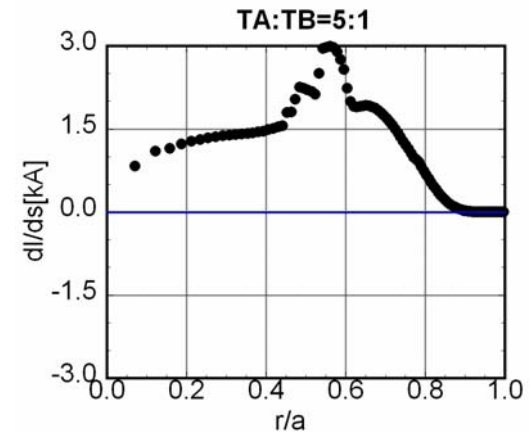
# 数値計算結果

正味のブートストラップ電流値

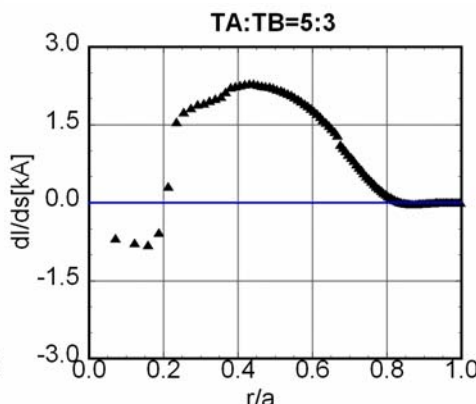
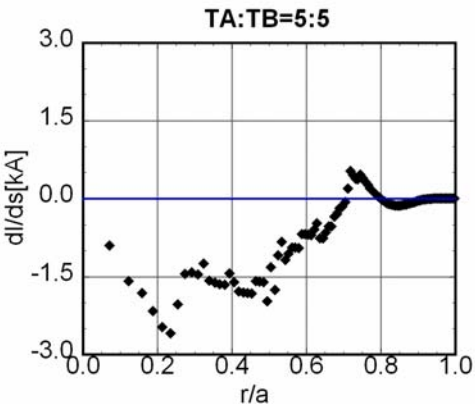


小 ← **バンピー成分** → 大

電流分布



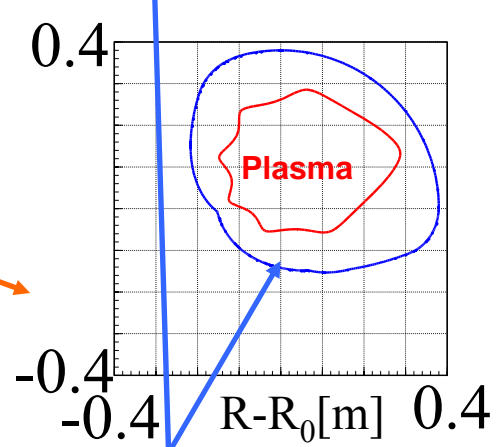
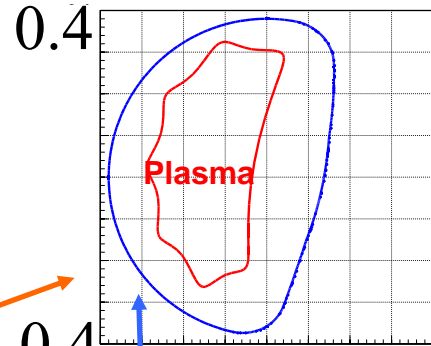
バンピー成分が減少するにつれて正味のブートストラップ電流値も減少した。



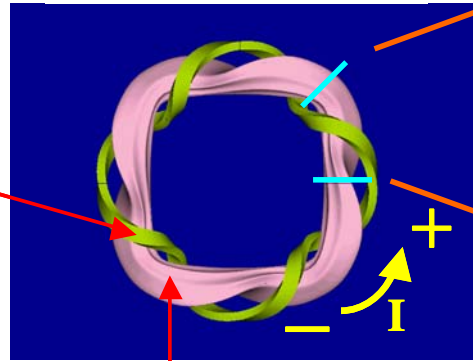
- 数値計算よりブートストラップ電流が磁場のバンピー成分に依存していることが分かった。
- また、このバンピー成分の強い依存性はバンピー成分が、トロイディシティやヘリシティと共に存在しているときのみ見られることがわかった。

# ロゴスキーコイル

ロゴスキーコイルはストレート部と(#13.5) コーナー部(#15)に設置されている。

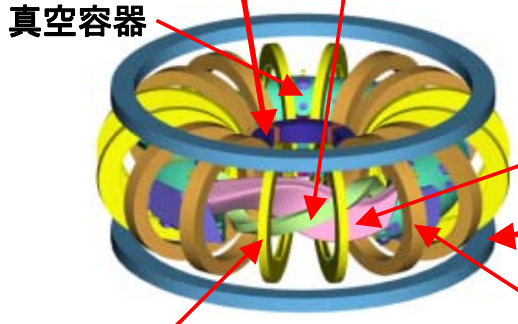


上から見た平面図



## ヘリオトロンJ装置

ヘリカルコイル  
内部垂直磁場コイル

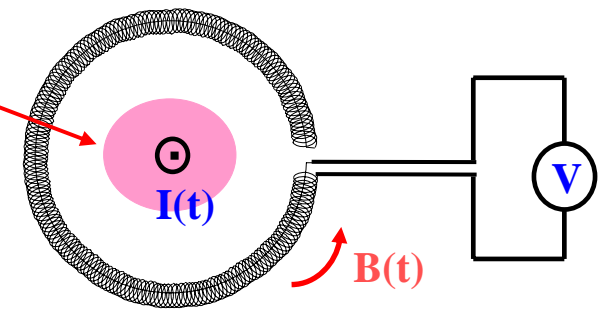


プラズマ  
外部垂直磁場コイル

トロイダルコイル B  
TB Coil

トロイダルコイル A  
TA Coil

## ロゴスキーコイル(トロイダル電流測定)



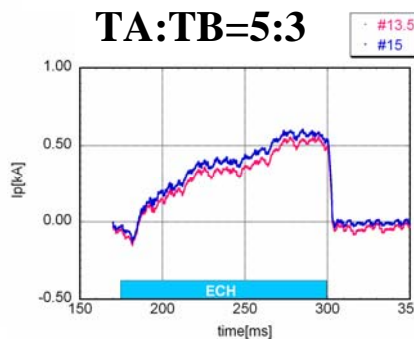
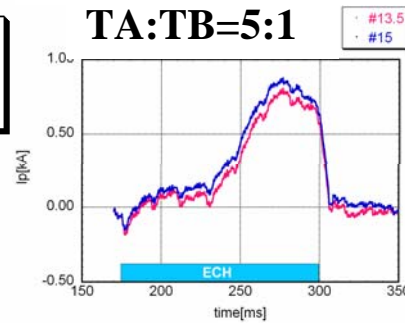
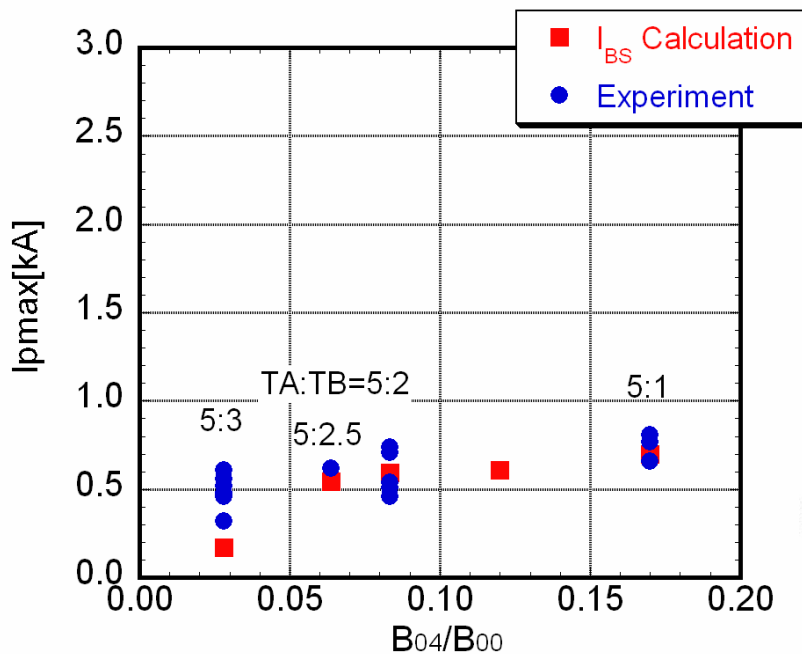


# 実験結果(1)

## ECHプラズマにおけるバンピネススキャン実験

線平均電子密度:  $\bar{n}_e = 0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、ECH: 120 msec 292 kW

ECH only Plasma

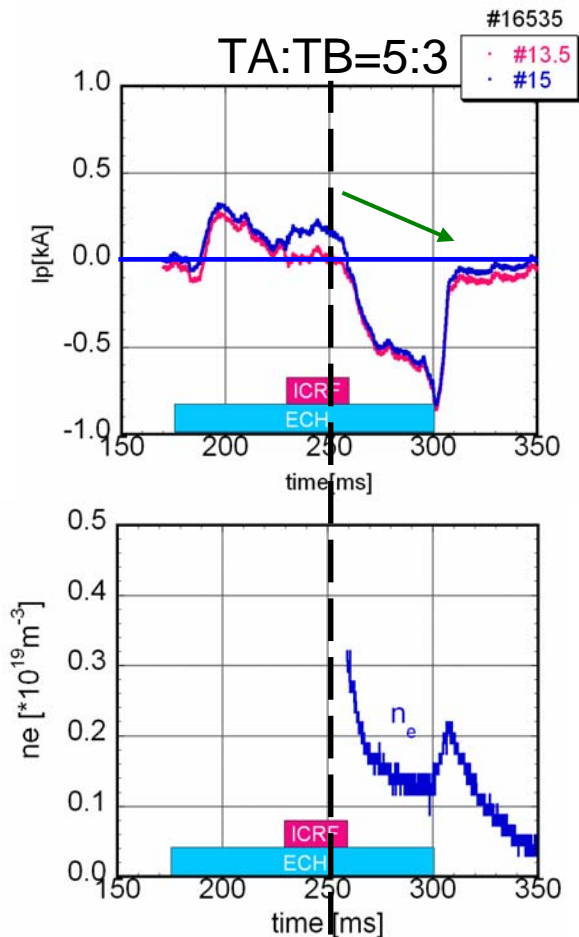


TA:TB	Experiment [kA]	$I_{BS}$ Calculation [kA]
5:1	0.75	0.70
5:1.5	-	0.61
5:2(STD)	0.57	0.59
5:2.5	0.62	0.54
5:3	0.50	0.17

- 測定値は全体的にブートストラップ電流の数値計算と同程度になった。
- TA:TB=5:3配位で測定値と計算結果にずれが見られる。実験値は数値計算より流れている。このずれに関しては検討を要する。
- ECCDの効果も評価する必要がある。

# 実験結果(2a)

線平均電子密度  $\bar{n}_e = 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  条件下、5:3配位でブートストラップ電流の理論予測(径電場は考慮に入れない)とは逆向きのトロイダル電流が流れた。



ガスパフ切

ガスパフを切った以降、約1 kA流れる。

- ブートストラップ電流が低電子密度条件下で電流方向が逆転する何らかの機構が存在する。
- ⇒ 径電場の形成によって径電場が無いときとは逆向きのトロイダル電流が誘起する。

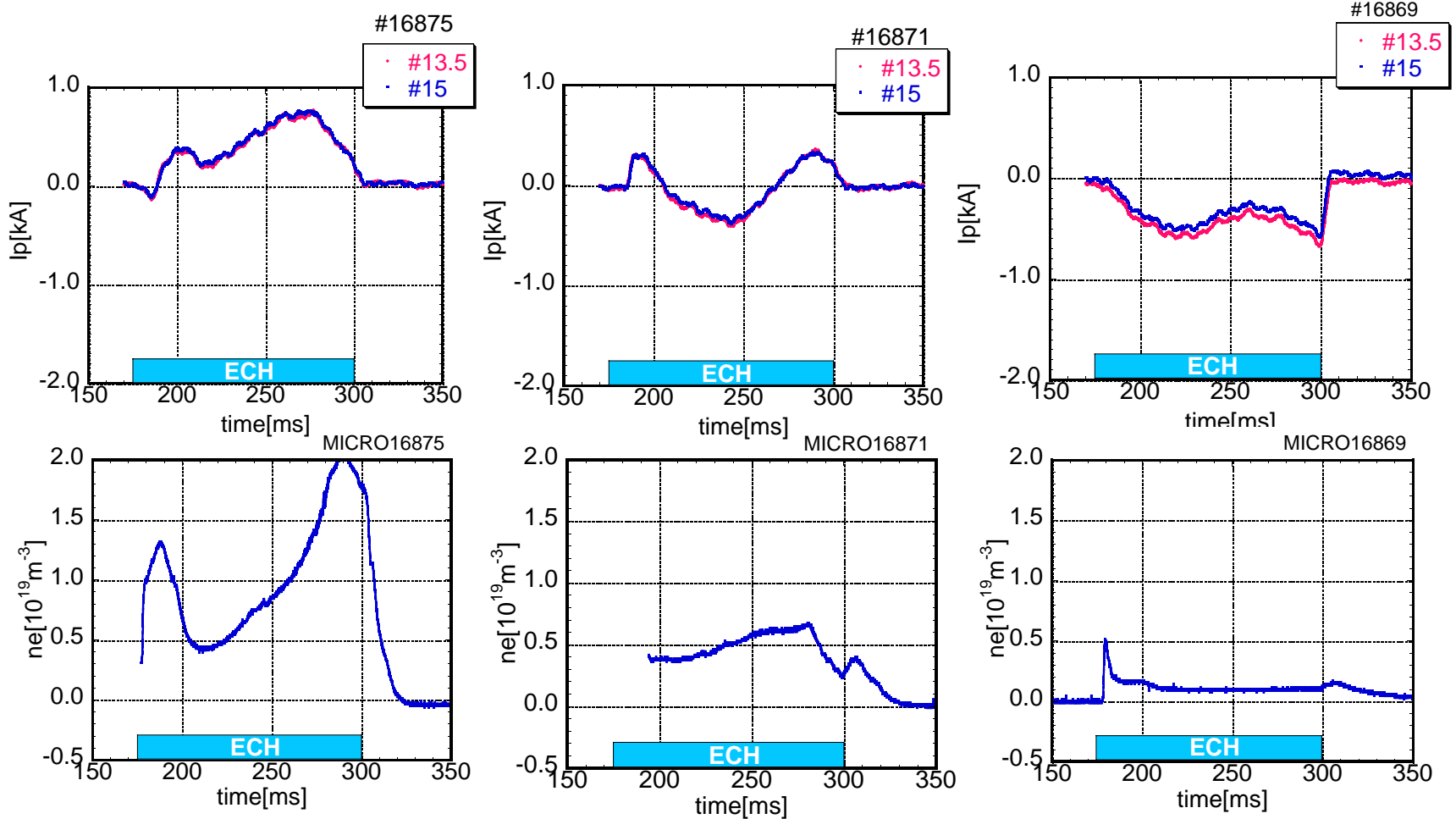
$$\langle j_{bs} B \rangle = L_{1e} \left( \frac{dP_e}{d\psi} + en_e E_\psi \right) + L_{1i} \left( \frac{dP_i}{d\psi} - en_e E_\psi \right)$$

$$-L_{2e} n_e \frac{dT_e}{d\psi} + L_{2i} n_e \frac{dT_i}{d\psi} \quad [1] \quad L_{1e}, L_{1i}, L_{2e}, L_{2i}: \text{新古典理論から出てくる係数}$$

- 電子サイクロトロン駆動電流(ECCD)の効果。
- ⇒ 原理的にはCW方向に流れる。

# 実験結果(2b)

線平均電子密度  $\bar{n}_e = 0.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  条件下、5:2配位でブートストラップ電流の理論予測とは逆向きのトロイダル電流が流れた。(磁場反転配位)

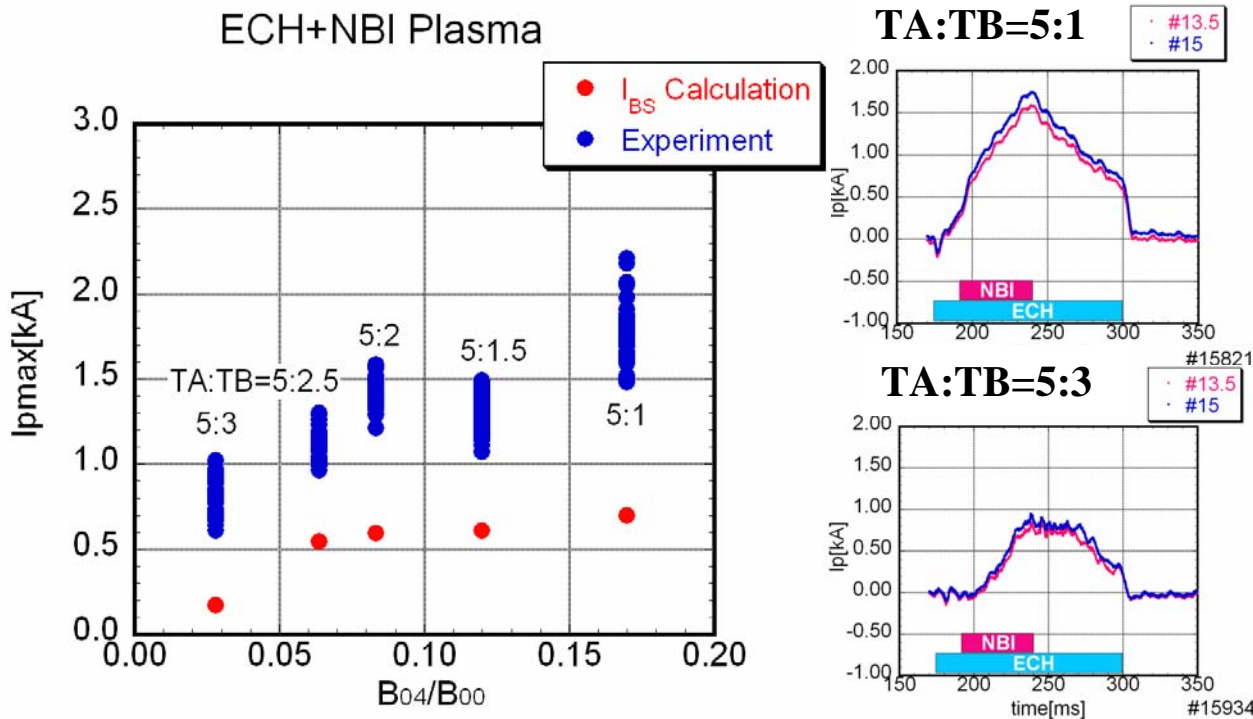


➤ どのショットも密度が  $\bar{n}_e = 0.1 \times 10^{19} \sim 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  でCCW方向に流れようとしている。

# 実験結果(3)

## ECH+NBIにおけるバンピネススキャン実験

線平均電子密度:  $\bar{n}_e = 0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , ECH: 120 msec 292 kW、NBI: 50 msec 470~500 kW

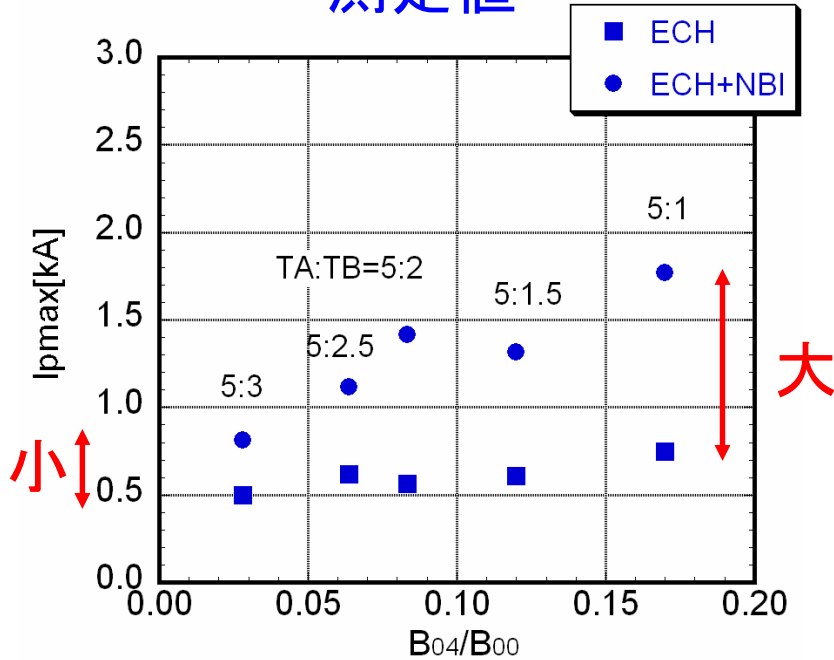


TA:TB	Experiment [kA]	$I_{BS}$ Calculation [kA]
5:1	1.77	0.70
5:1.5	1.32	0.61
5:2(STD)	1.42	0.59
5:2.5	1.12	0.54
5:3	0.81	0.17

➤ ブートストラップ電流の理論予測値に比べて、系統的に正の大きな値をとっている。⇒これは予測される**大河電流**の方向と一致している。

# 大河電流の概算

測定値



$$J_{\text{Ohkawa}} = Z_b e n_b v_{b\parallel} \left(1 - \frac{Z_b}{Z_{\text{eff}}} (1 - G)\right)$$

$Z_b$ :ビームの電荷数、

$Z_{\text{eff}}$ :プラズマの実効電荷数

$n_b$ :ビームの密度

$v_{b\parallel}$ :ビームイオンの速度の磁場に平行成分

$G$ :形状因子

- 大河電流はTA:TB=5:1配位が一番よく流れている。
- TA:TB=5:1配位が高エネルギー粒子のdecayが一番長いことが実験より分かっている。⇒ $\langle n_b v_{b\parallel} \rangle$ が他の配位よりも大きい可能性有。
- $Z_{\text{eff}}$ やGを検討する必要がある。



# まとめ

➤ ブートストラップ電流が磁場のバンピー成分に依存しているかを調べるために、SPBSCコードを用いて数値計算を行った。その結果、バンピー成分が減少するにつれて、正味のブートストラップ電流値も減少することが分かった。数値計算により、**ブートストラップ電流が磁場のバンピー成分に強く依存していることが分かった。**

➤ ECH onlyプラズマにおいてバンピネスのみを変化させたときのトロイダル電流の変化を調べた。その結果、測定された**トロイダル電流値は全体的にブートストラップ電流の数値計算と同程度であることが分かった。**ただし、**TA:TB=5:3配位では測定値と計算結果にずれが見られた。**このずれに関しては検討を要する。また、ECCDの効果も評価する必要がある。

また、低電子密度条件下で、ブートストラップ電流の理論予測とは逆向きの電流が流れた。この原因として、**径電場の生成によるブートストラップ電流の方向の逆転、およびECCDの効果**が考えられる。これらの逆転現象を解明するために、まず電場を考慮に入れたSPBSCコードで数値計算を行ってみることが必要である。

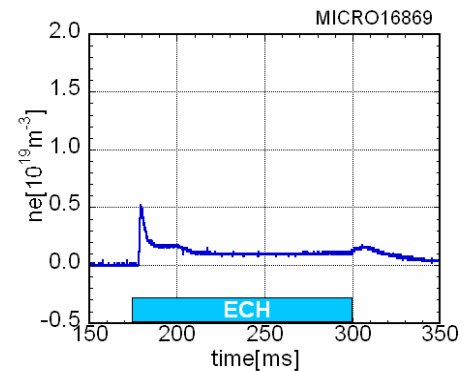
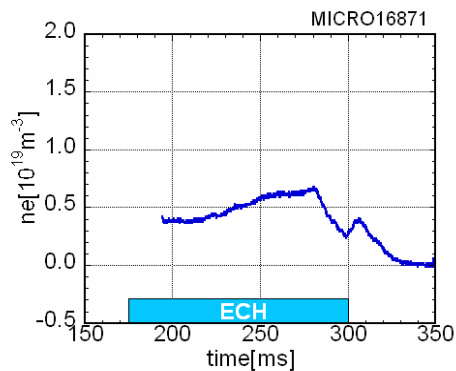
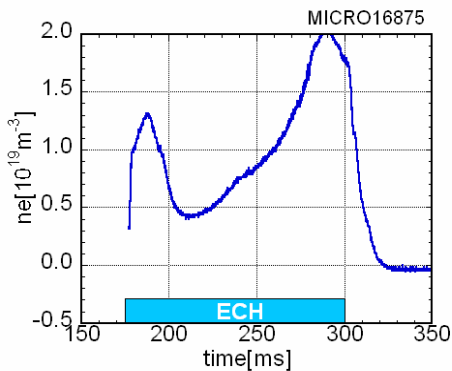
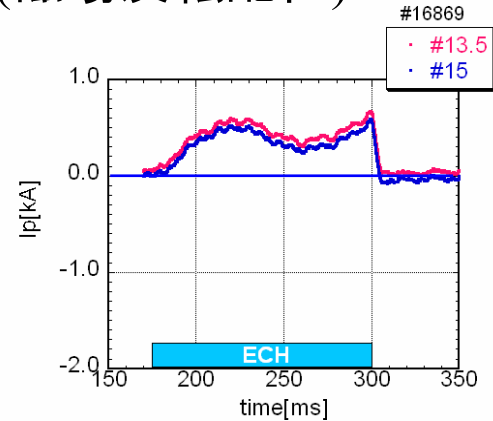
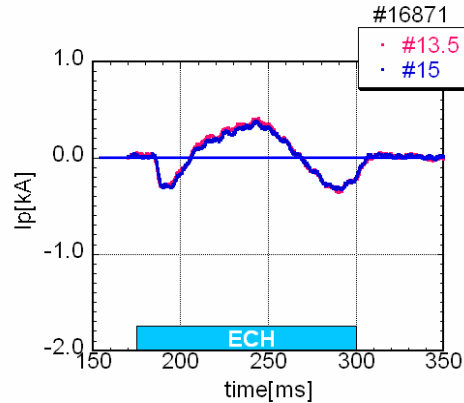
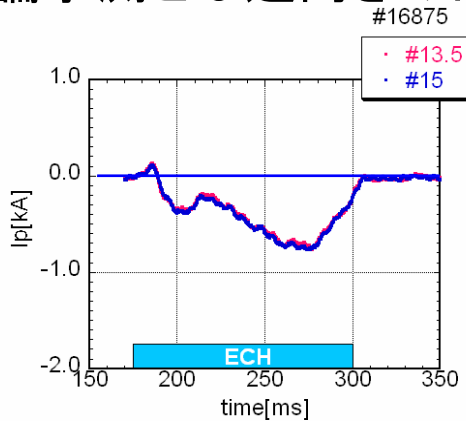
➤ ECH+NBIプラズマにおいてバンピネスのみを変化させたときのトロイダル電流の変化を調べた。その結果、予測される大河電流の方向と一致するように測定値に増分が見られた。また、 $I_{\text{ECH+NBI}} - I_{\text{ECH}}$ を**大河電流値**と見なすと**TA:TB=5:1配位で一番良く流れる**ことが分かった。これを実験的に詳細に検討するために、まず各配位で不純物量を調べ $Z_{\text{eff}}$ の違いを検討する等の必要がある。

# 今後の課題

- 本研究では、ブートストラップ電流の数値計算を基に、トロイダル電流の解析を進めてきた。しかし、低電子密度条件下でのトロイダル電流の振る舞いなど、数値計算(径電場を考慮に入れない)では説明の付かない結果も得られた。今後、その違いを解明するために例えば、**径電場を考慮した数値計算**を行って理論的に解析を進めること、また実験的には**密度変化に対するトロイダル電流の変化を調べる**等の解析を行っていく。
- また、ヘリオトロンJではNBIが2機に増設され、それらによるバランス入射が可能となり、**さまざまなNBIの入射条件で実験を行う**ことができる。よって、バランス入射による実験解析を行うとともに、理論モデルの構築を進めて、ヘリオトロンJにおける大河電流の機構を解明し、大河電流を局所的に制御した閉じ込め改善への糸口を探求する。

# 実験結果(2b)

線平均電子密度  $\bar{n}_e = 0.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  条件下、5:2配位でブートストラップ電流の理論予測とは逆向きのトロイダル電流が流れた。(磁場反転配位)



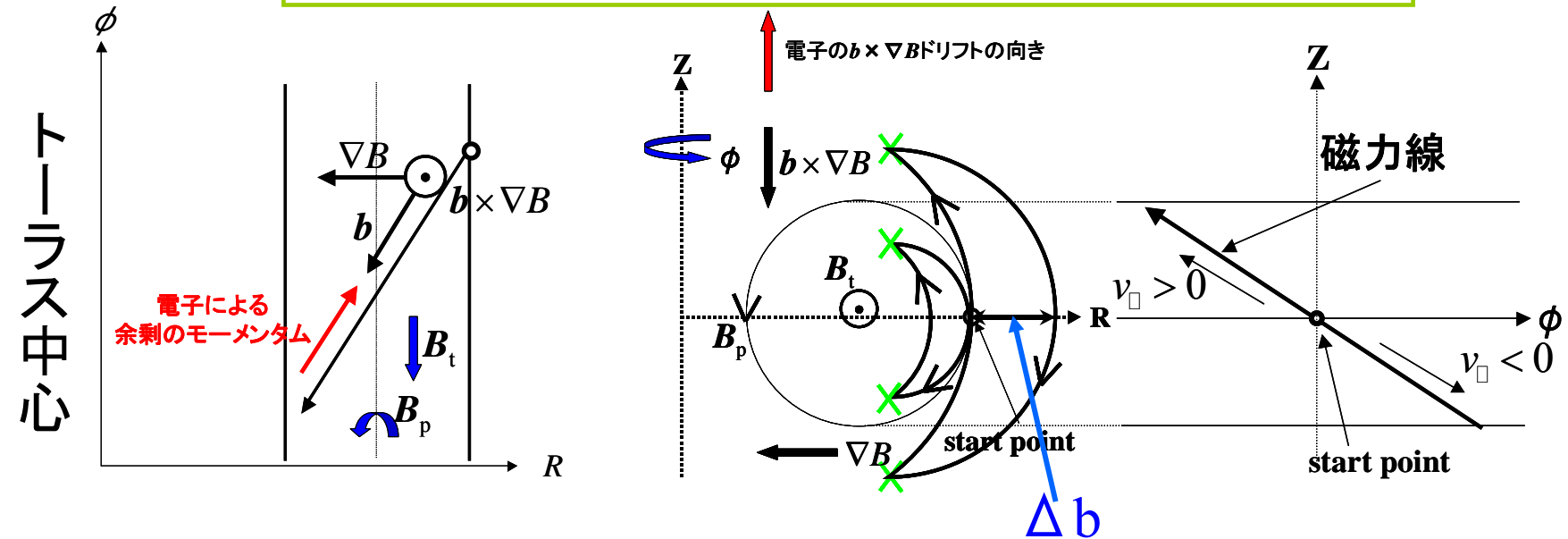
➤ どのショットも密度が  $\bar{n}_e = 0.1 \times 10^{19} \sim 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  でCCW方向に流れようとしている。

# ブートストラップ電流の粒子的な描像(その1)

磁場に勾配( $\nabla B$ )があると、荷電粒子は $v_{dr}$ でドリフトする。

$$\text{ドリフト速度: } \mathbf{v}_{dr} \sim \frac{mv_{\perp}^2}{2qB^3} (\mathbf{B} \times \nabla B)$$

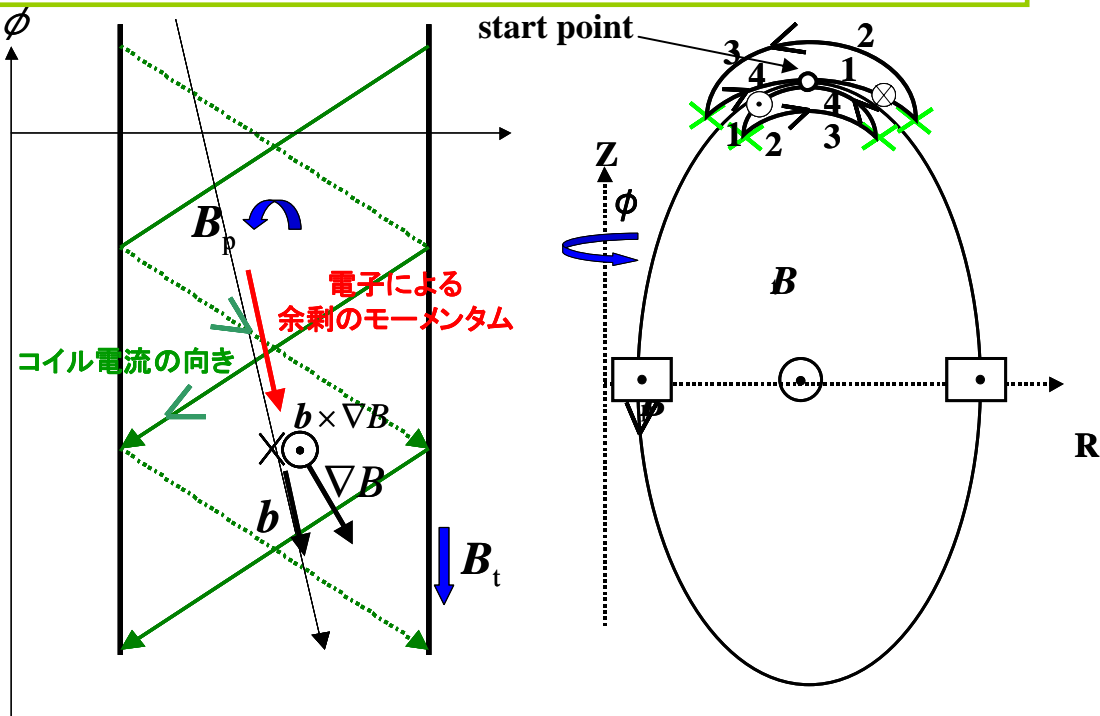
## <トカマク(トロイディシティによる捕捉粒子)>



➤ ある点を通るバナナ粒子。密度が違くと $\parallel$ 方向にモーメントムが発生。磁場と同方向に電流が生まれる $\Rightarrow$ BS電流。

$$\text{バナナ幅: } \Delta_b \sim v_{dr} \tau_u$$

## <直線ヘリオトロン(ヘリシティによる捕捉粒子)>



$$\text{ドリフト速度: } v_{dr} \sim \frac{mv_{\perp}^2}{2qB^3} (B \times \nabla B)$$

$$\text{バナナ幅: } \Delta_b \sim v_{dr} \tau_u$$

・バンピネスはコイルをさらに傾けるのでヘリオトロンに比べて  $B \times \nabla B$  は小さい。よってバンピネスのみに捕捉された粒子によるブートストラップ電流は小さい。

➤  $\Delta_b$  が大きいほど密度勾配を大きく感じ、BS電流は大。  $\Delta_b \propto v_{dr} \Rightarrow B \times \nabla B$  が大きいほどBS電流はよく流れる。

➤ トカマクと直線ヘリカルではBS電流の向きが逆。

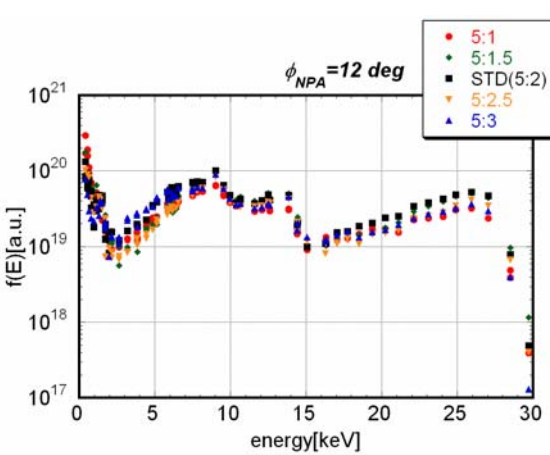
➤ ヘリオトロンJはトロイディシティもヘリシティもバンピネスも持っているので、配位によって流れ方が変わる。⇒ 電流制御の手段となる。

➤ ヘリオトロンJ装置では、基本的にはヘリシティが作る方向(磁場と逆方向)にブートストラップ電流は流れる。

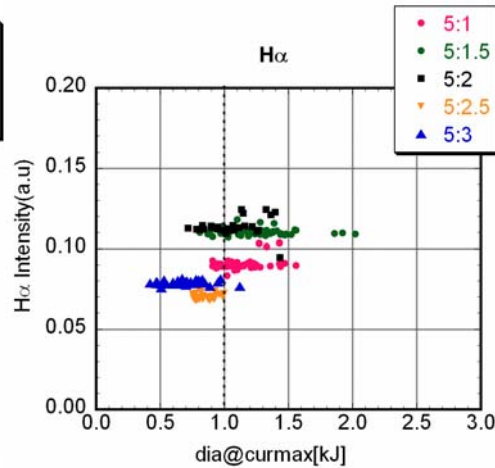


$$\frac{dN(E)}{dt} = n_i n_0 \sigma_{CX}(E) \sqrt{\frac{2E}{m_i}} f_i(T_i, E)$$

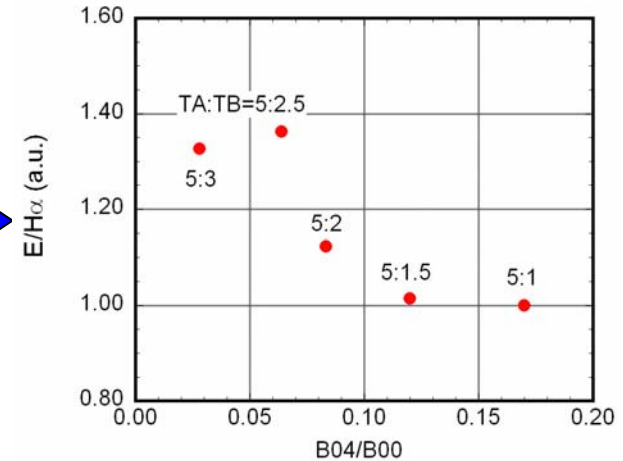
$dn(E)/dt$ : 中性粒子の個数  
 $m_i, n_i, T_i$ : イオンの質量、密度、温度  
 $\sigma$ : 荷電交換反応断面積、 $f_i$ : エネルギー分布関数  
 $n_0$ : 中性粒子の密度



$n_i n_0$



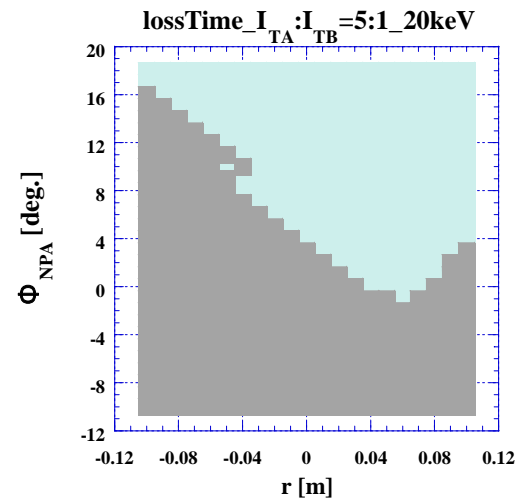
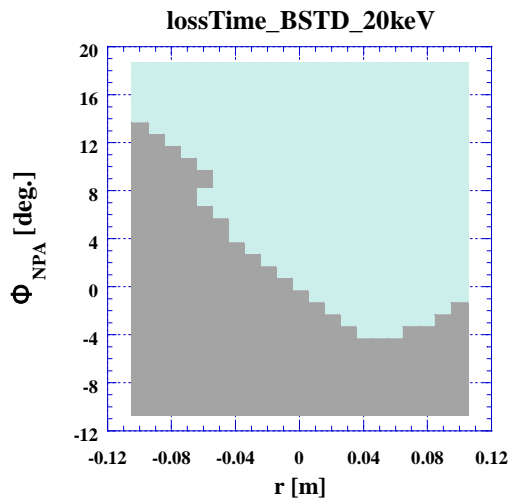
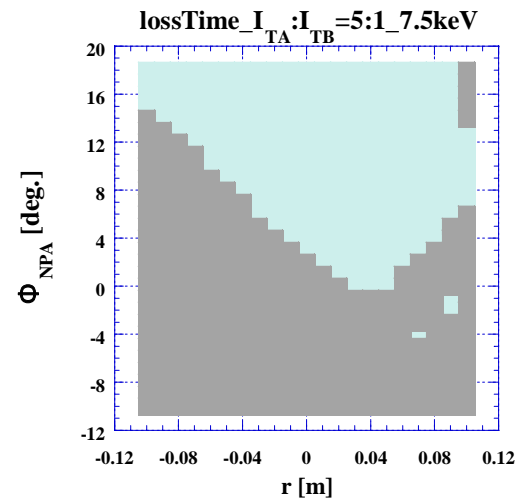
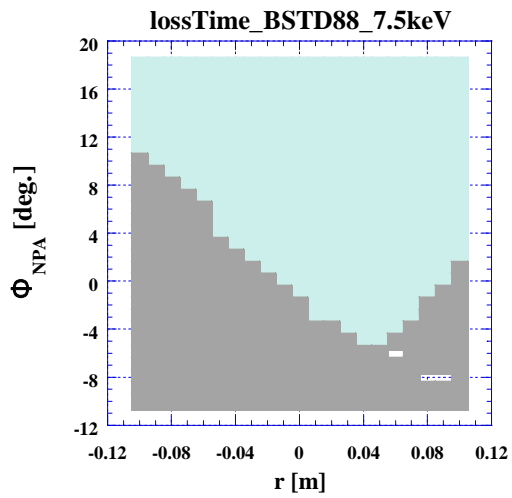
$H_\alpha$  の強度  $\propto n_0$



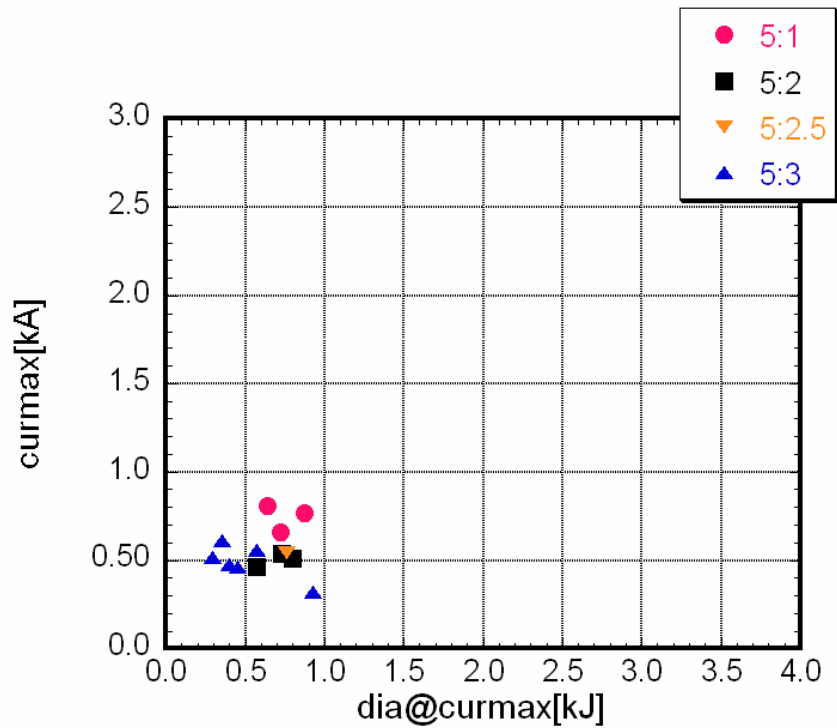
荷電交換反応断面積が各配位で一定であると仮定。

$H_\alpha$  から見る限りは、5:1配位の $n_i$ は大きくない。

$Z_{\text{eff}}$ 、 $G$ の効果も考えられる。



ECH only Plasma



ECH+NBI Plasma

