

Two-fluid Equilibrium Transition of ST due to Multi-pulsing CHI

T. Kanki¹ and M. Nagata²

¹*Japan Coast Guard Academy*, ²*University of Hyogo*



NEXT Workshop

13 - 14 January, 2015; Kyoto Terrsa, Japan

発表内容:

- 1) 背景と目的
- 2) HIST装置のダブルパルスCHI実験結果: 径方向分布(密度, 流速, 電場)
- 3) 軸対称2流体平衡方程式
- 4) 数値計算結果
- 5) まとめ

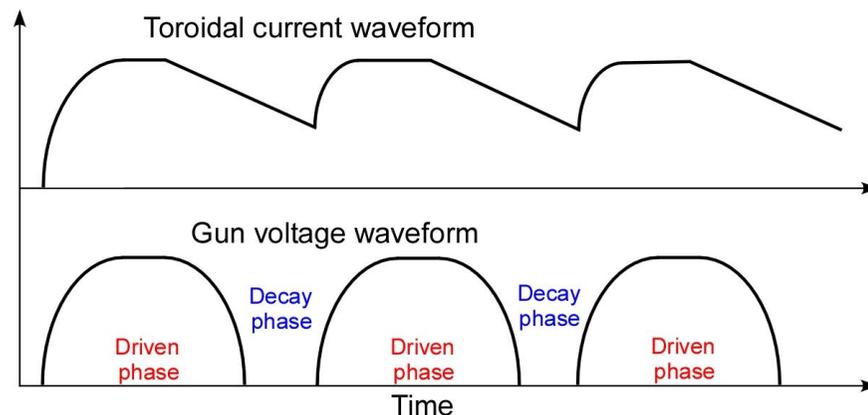
- CHIはこれまでスフェロマックやSTの非誘導的な電流立ち上げや効率的な電流駆動法として利用されてきた。
 - ➡ 電流駆動過程では揺動が閉じ込めを悪化させる問題.
- M-CHIと呼ばれる、電流駆動過程と良好な閉じ込めが得られる減衰過程を交互に繰り返す方法が提案されている。
 - ➡ 電流駆動と閉じ込めを両立させて、配位を準定常維持化
- HIST装置におけるダブルパルスCHI実験
 - ✓ 高トロイダル磁場側での中心オープン磁束コラム(OFC)領域周辺
 - 急峻な密度勾配(OFCの幅 $w_{\text{OFC}} \sim 7\text{cm}$, イオン表皮長 $\ell_i \sim 3\text{cm}$)を観測
 - ポロイダル・シア流, 径電場シアを観測
 - 2流体効果が重要

- ✓ 流れのある2流体平衡

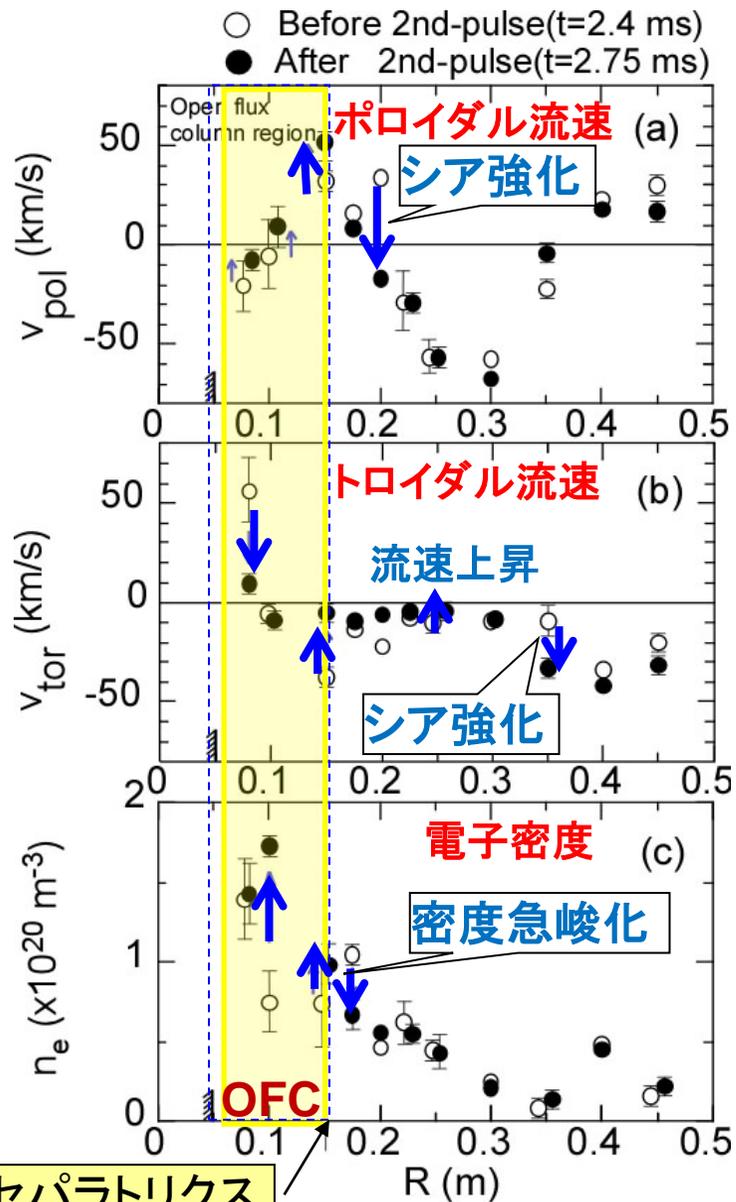
- パルス再印加時に生じる密度急峻化の平衡への影響

[1] S. Woodruff, et al., PRL **90**, 205002-1 (2004).

[2] E.B. Hooper, PPCF **53**, 085008 (2011).

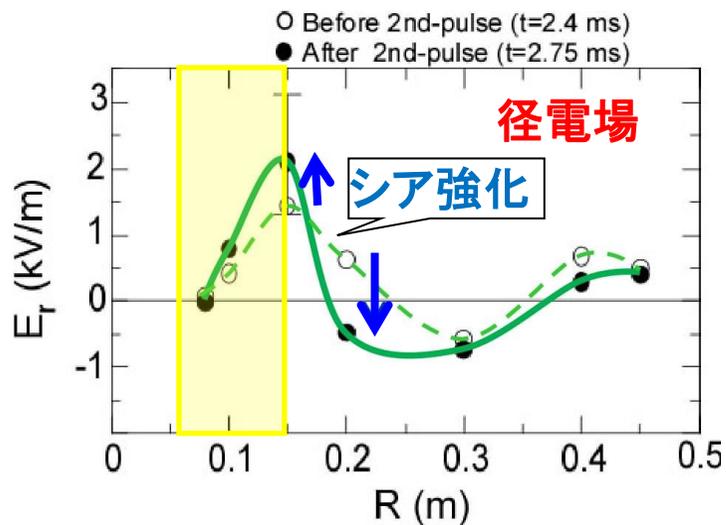


HIST装置におけるダブルパルスCHI実験結果の径方向分布 (電子密度, フロー速度, 径電場)

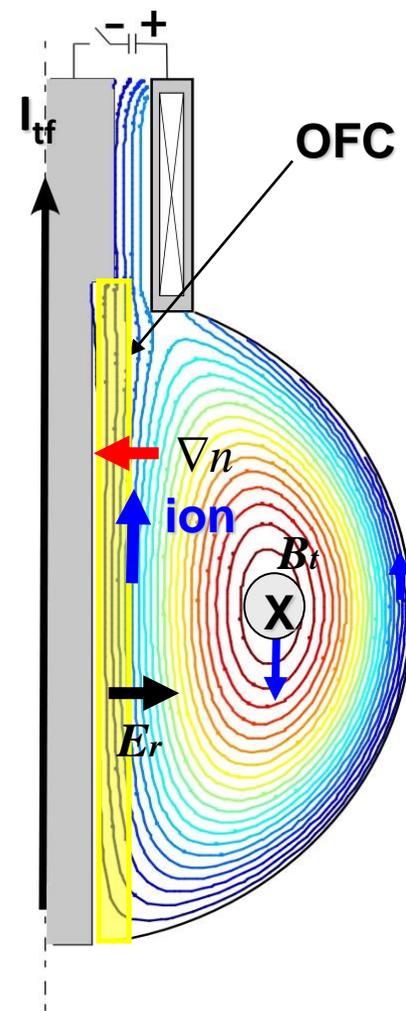


ポロイダル・フローシアがセパトトリクス付近で強化される。

トロイダル・フロー速度がセパトトリクス付近で上昇。



径電場シアがセパトトリクス付近で強化される。



規格化された定常状態での散逸のない2流体方程式系



Equation of ion motion $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p_i / n + \mathbf{E} + (1/\varepsilon) \mathbf{u} \times \mathbf{B}$

Equation of electron motion $0 = -\nabla p_e / n - \mathbf{E} - (1/\varepsilon) \mathbf{u}_e \times \mathbf{B}$

Equation of continuity $\nabla \cdot (n\mathbf{u}) = 0 \quad \nabla \cdot (n\mathbf{u}_e) = 0$

Entropy conservation $\mathbf{u} \cdot \nabla s_i = 0 \quad \mathbf{u}_e \cdot \nabla s_e = 0$

Equations of state $p_i = n^\gamma \exp[(\gamma - 1)s_i] \quad p_e = n^\gamma \exp[(\gamma - 1)s_e]$

Gauss' law for magnetic field $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Ampere's law $n(\mathbf{u} - \mathbf{u}_e) = \varepsilon \nabla \times \mathbf{B}$

Faraday's law $\nabla \times \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \mathbf{E} = -\nabla \phi_E$

Two-fluid parameter: $\varepsilon \equiv \ell_i / L$

ion skin depth: $\ell_i \equiv c / \omega_{pi}$, L : system scale length

$\ell_i \propto m_i^{1/2} \rightarrow \varepsilon$: ion inertial effect

HIST	$\varepsilon = 0.072$
NSTX	$\varepsilon = 0.034$
TS-3(FRC)	$\varepsilon = 0.20$

軸対称2流体平衡方程式



Generalized Grad-Shafranov equations

ion:
$$\underbrace{\bar{\psi}'_i r^2 \nabla \cdot \left(\frac{\bar{\psi}'_i \nabla Y}{n r^2} \right)}_{\text{poloidal flow inertia}} = \underbrace{\frac{r}{\varepsilon} (B_\theta \bar{\psi}'_i - n u_\theta)}_{\mathbf{u} \times \mathbf{B} \text{ force}} + \underbrace{nr^2 (H'_i - T_i S'_i)}_{\text{gradient of pressure, flow energy, and electrostatic energy}} \rightarrow u_\theta$$

Arbitrary surface functions

$$\begin{aligned} &\bar{\psi}_e(\psi), \bar{\psi}_i(Y), \\ &H_e(\psi), H_i(Y), \\ &S_e(\psi), S_i(Y) \end{aligned}$$

electron:
$$r^2 \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \psi}{r^2} \right) = \frac{r}{\varepsilon} (B_\theta \bar{\psi}'_e - n u_\theta) - nr^2 (H'_e - T_e S'_e) \rightarrow \psi$$

Generalized Bernoulli equations

ion:
$$\underbrace{\frac{\gamma}{\gamma-1} n^{\gamma-1} \exp[(\gamma-1)S_i]}_{\text{enthalpy}} + \frac{u^2}{2} + \phi_E = H_i \rightarrow n$$

Auxiliary equations

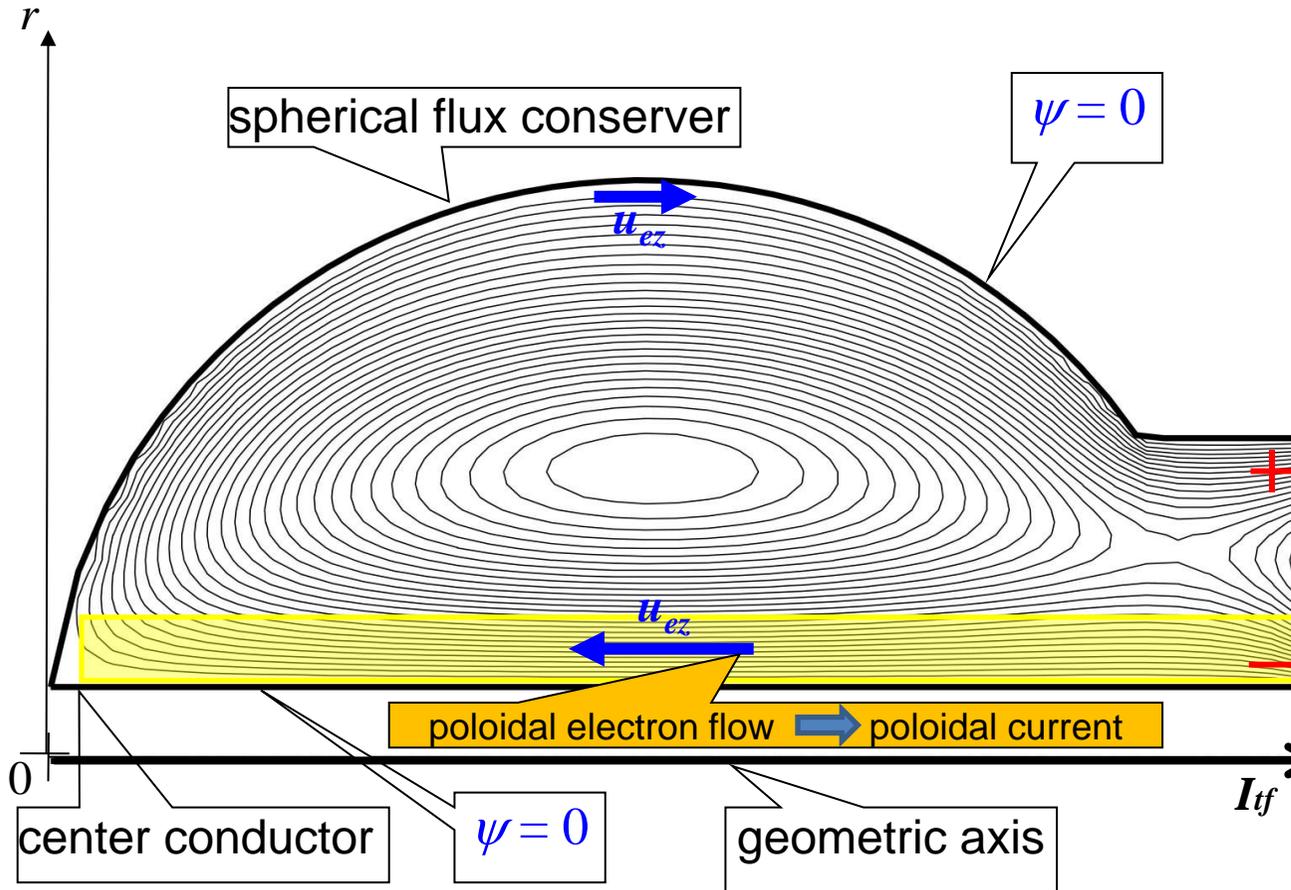
$$Y(r, z) \equiv \psi + \varepsilon r u_\theta$$

$$B_\theta = \frac{1}{\varepsilon r} (\bar{\psi}_i - \bar{\psi}_e)$$

electron:
$$\frac{\gamma}{\gamma-1} n^{\gamma-1} \exp[(\gamma-1)S_e] - \phi_E = H_e$$

$$\mathbf{u}_p = \frac{\nabla \bar{\psi}_i}{nr}$$

境界条件と仮定



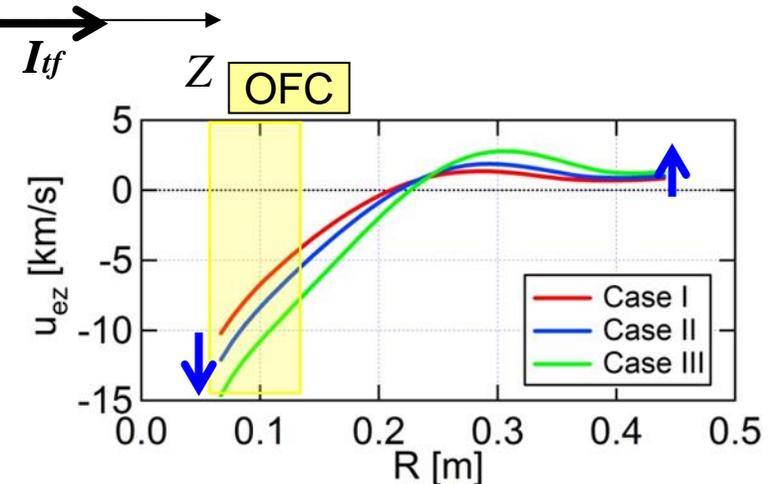
Function form of bias flux

$$\psi_{\text{bias}}(r) = \frac{4\psi_s}{(R_1 - R_2)^2} (r - R_2)(R_1 - r)$$

Free slip boundary condition

bias flux

✓ ガン電圧再印加(再ヘリシティ入射)によって、オープン磁束に沿ったポロイダル電子フローが駆動されると仮定



数値計算結果



- ✓ ガン電圧再印加(再ヘリシティ入射)によって、オープン磁束に沿ったポロイダル電子フローが駆動される.
- ✓ ポロイダル電流が外部トロイダル磁場コイル電流と同じ向きに駆動される.
- ✓ 常磁性のトロイダル磁場が閉じた磁束領域で増大.

- ✓ イオンのトロイダル・フロー速度が閉じた磁束領域で増大.
同フローはトロイダル電流と同じ向きであり, 同電流 (λ , ポロイダル磁束) を増大させる.

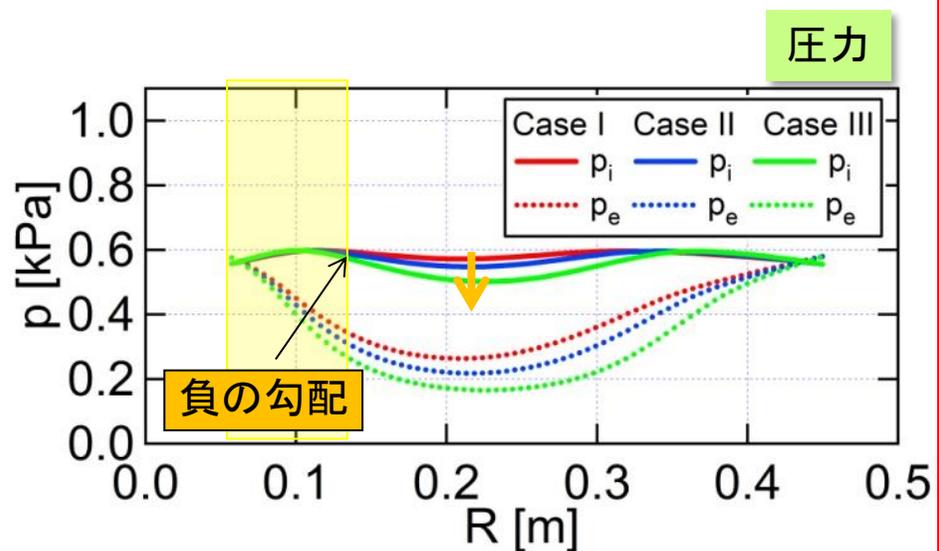
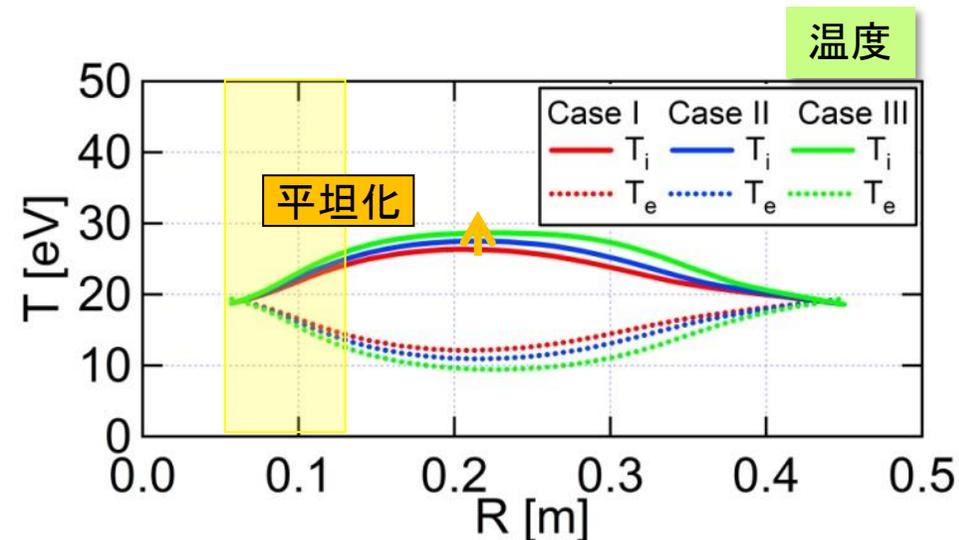
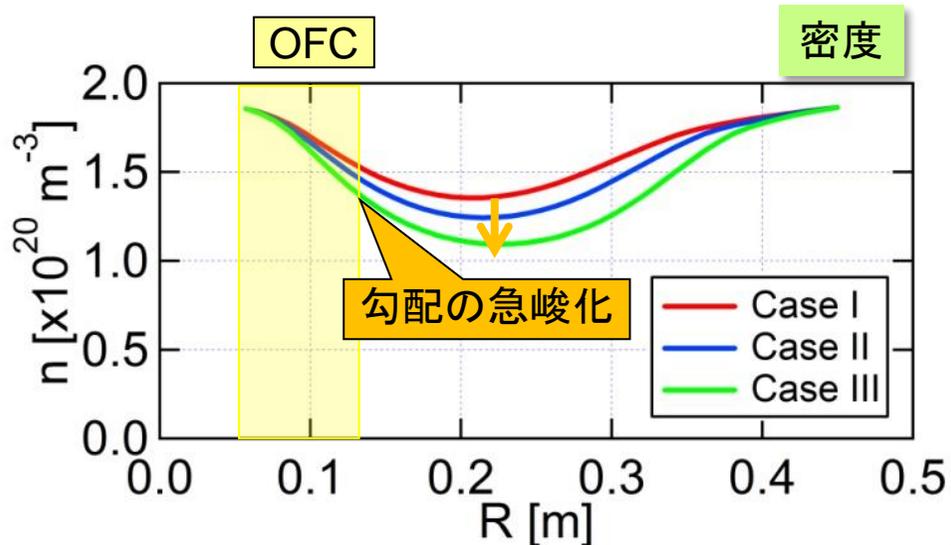
$$u_{\theta} = \frac{\bar{\psi}'_e}{n} \underbrace{B_{\theta}}_{\text{ドリフト速度}} - \underbrace{\epsilon r (H'_e - T_e S'_e)}_{\text{ホール効果}} - \epsilon \frac{r}{n} \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \psi}{r^2} \right)$$

- ✓ 一般化されたベルヌーイの式に従って, イオンのフロー・エネルギー(動圧)の増大とともに, エンタルピーが減少する.

$$\underbrace{h_i + h_e}_{\text{エンタルピー}} + \frac{u^2}{2} = H_i + H_e, \quad h_{\alpha} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} n^{\gamma - 1} \exp[(\gamma - 1)S_{\alpha}]$$

- ✓ 密度が閉じた磁束領域で減少し, セパラトリクス付近で密度勾配が増大.

密度, 温度, 圧力の径方向分布



✓ 密度は閉じた磁束領域で減少し, その勾配はセパトリス付近で急峻化する。

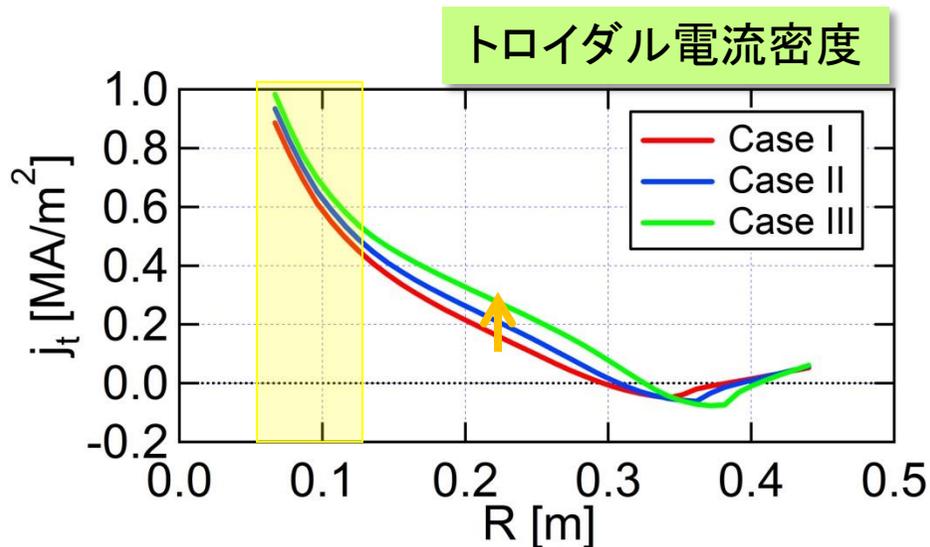
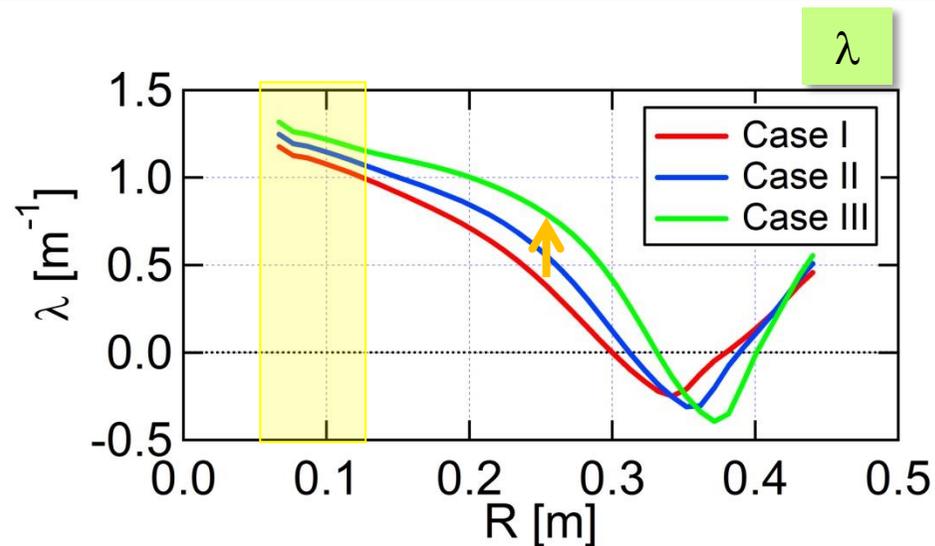
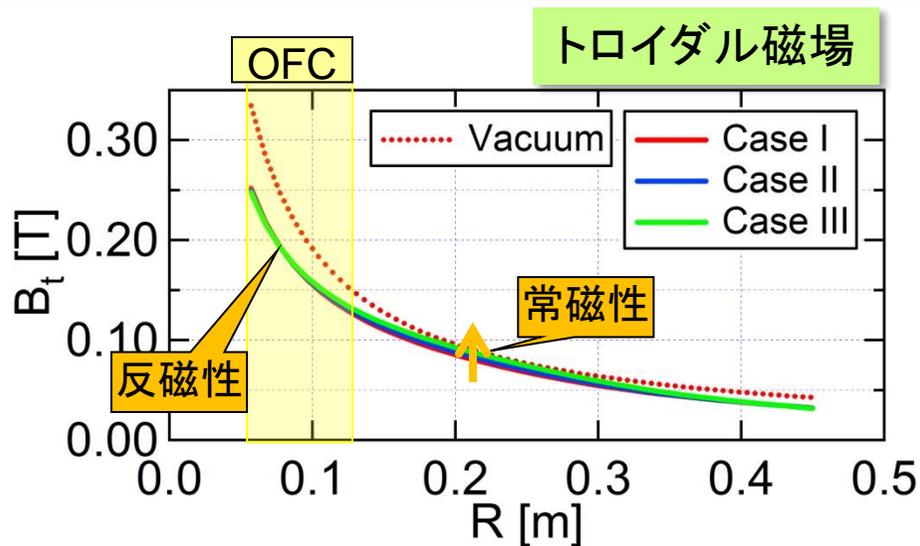
✓ イオン温度は閉じた磁束領域でやや増大し, 平坦化するが, ほとんど変化はない。

✓ 電子温度はややホロー分布が強化される。

✓ イオン圧力の勾配はセパトリス付近で負になる。

✓ 電子圧力はややホロー分布が強化される。

磁場と電流密度の分布

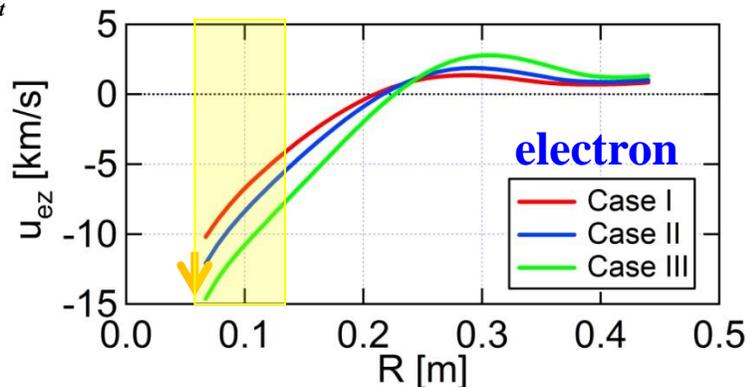
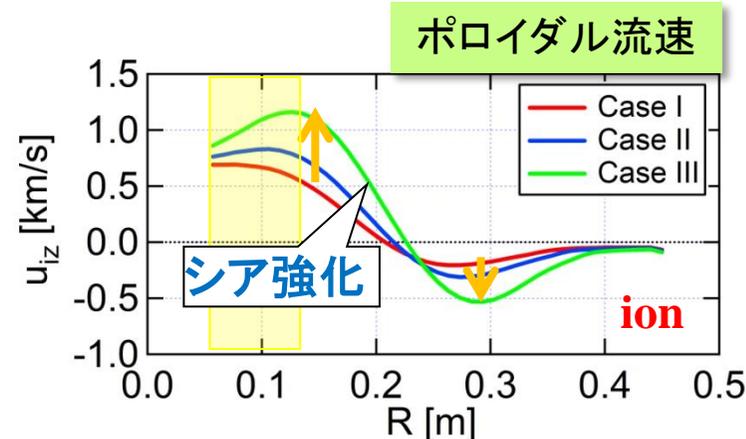
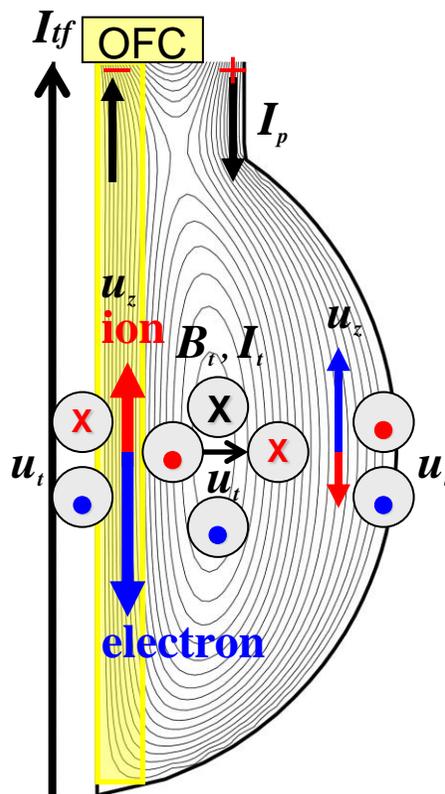
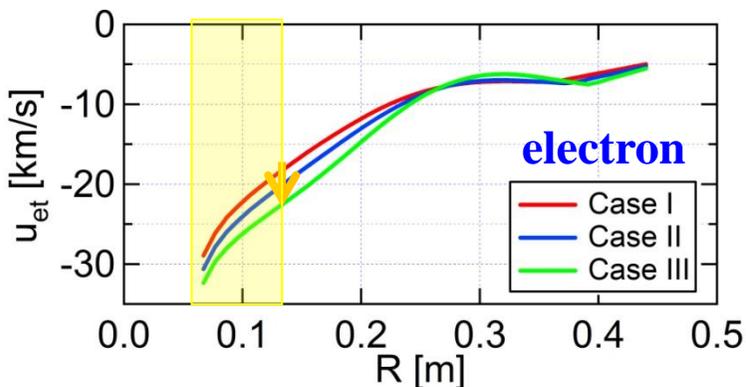
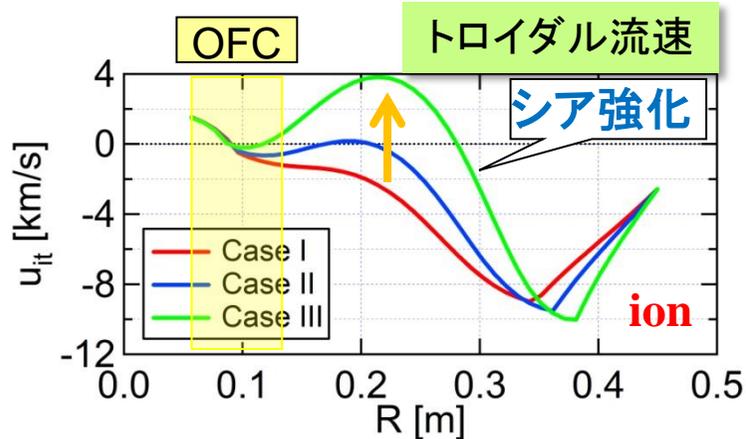


✓トロイダル磁場はOFC領域では反磁性であるが、閉じた磁束領域では常磁性になる。

✓トロイダル電流密度と λ はホロー分布であるが、閉じた磁束領域で増大する。

➡閉じたポロイダル磁束が増大。

フロー速度分布



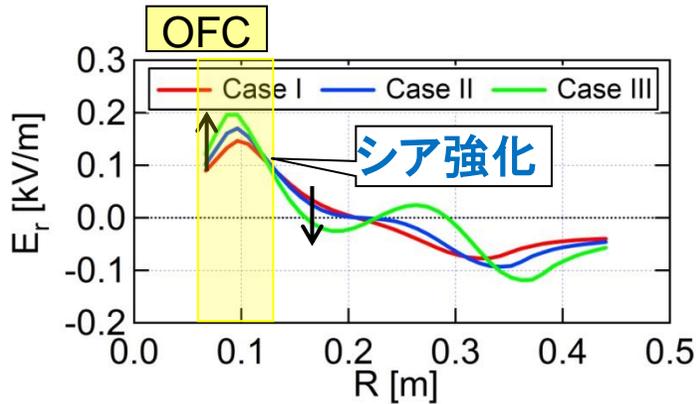
トロイダル流速

- ✓ イオン流速は閉じた磁束領域でトロイダル電流と反対の向きから同じ向きの方向へ増大する。
- ✓ 電子流速はOFC領域でわずかにトロイダル電流と反対方向に増大する。

ポロイダル流速

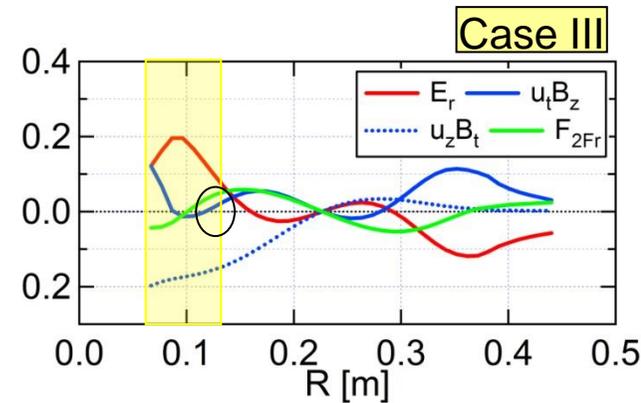
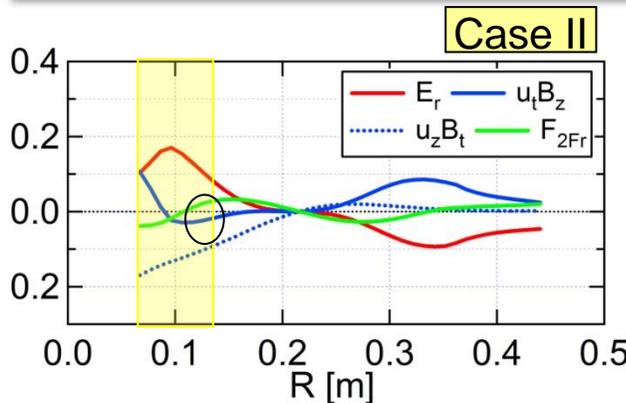
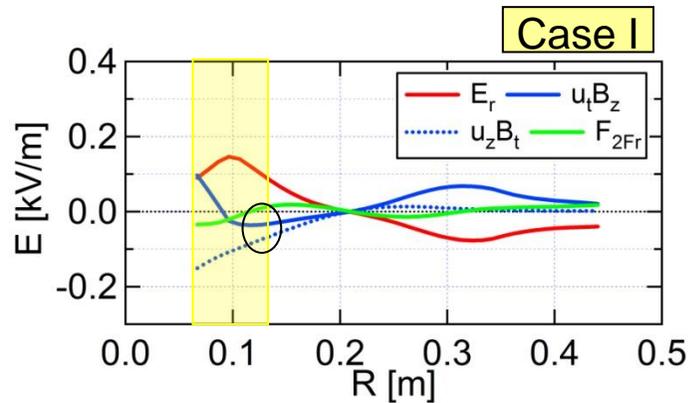
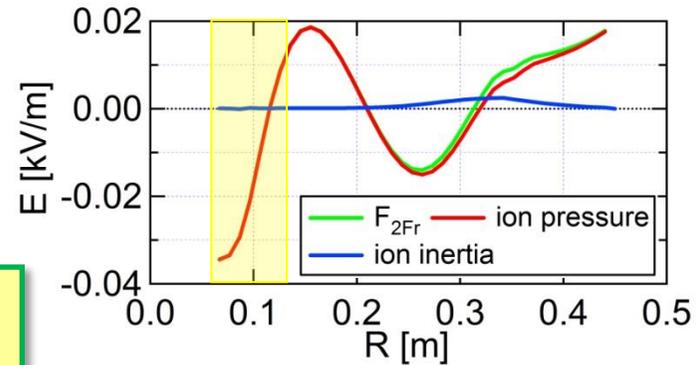
- ✓ イオン流速はポロイダル電流と同じ向きであり、セパトリクス付近で増大し、シアが強化される。
→ トロイダル磁場は閉じた磁束領域で常磁性になる。
- ✓ 電子流速はOFC領域でわずかにポロイダル電流と反対方向に増大させている。

オームの法則と2流体効果



径電場シアがセパトロクス付近で強化される。

2流体効果はイオンの反磁性効果による。



径電場は磁気力 $1/\epsilon u_t B_z$ の項に強く依存する。

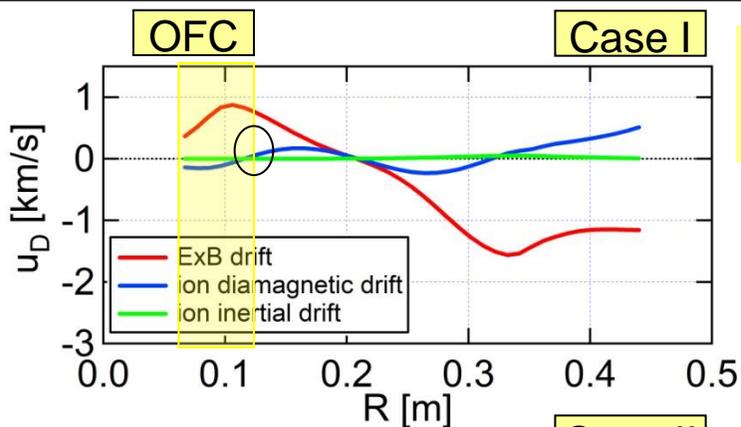
オームの法則:
$$\mathbf{E} + \frac{1}{\epsilon} \mathbf{u} \times \mathbf{B} + \mathbf{F}_{2F} = 0, \quad E_r + \frac{1}{\epsilon} (u_t B_z + u_z B_t) + F_{2Fr} = 0$$

2流体効果:
$$\mathbf{F}_{2F} = -\nabla p_i / n - \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$$

↑
イオンの反磁性効果

↑
イオンの慣性効果

イオンのドリフト速度のポロイダル成分



$E \times B$ drift velocity

$$u_E = \varepsilon \frac{E \times B}{B^2}$$

Diamagnetic drift velocity

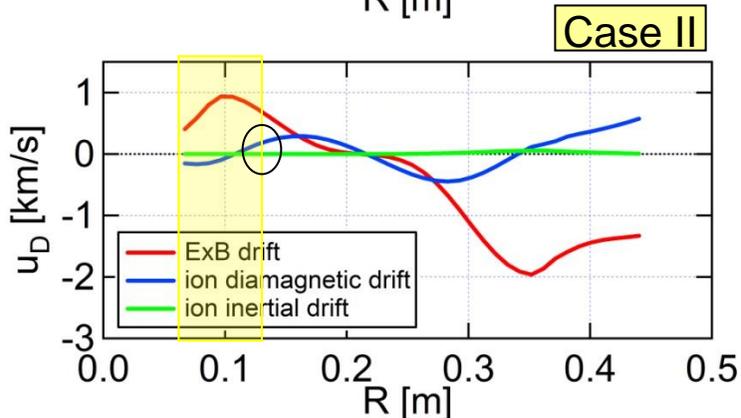
$$u_D = \varepsilon \frac{B \times \nabla p_i}{B^2 n}$$

Inertial drift velocity

$$u_i = \varepsilon \frac{B \times (u_i \cdot \nabla u_i)}{B^2}$$

✓ イオンの反磁性ドリフト速度の大きさは、 $E \times B$ ドリフト速度の大きさと同程度である。

✓ イオンの慣性ドリフト速度は、ほぼ無視できるくらい小さい。

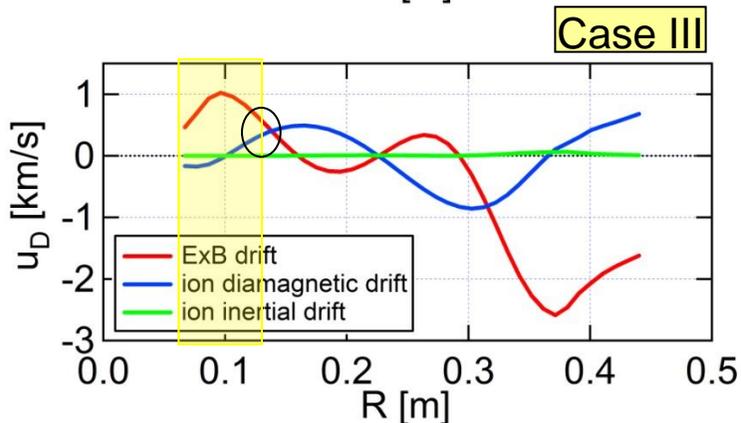


Case I

✓ イオンの反磁性ドリフト速度は、セパトリクス付近でほぼゼロであり、OFC領域で $E \times B$ ドリフト速度と向きが反対である。

Case II

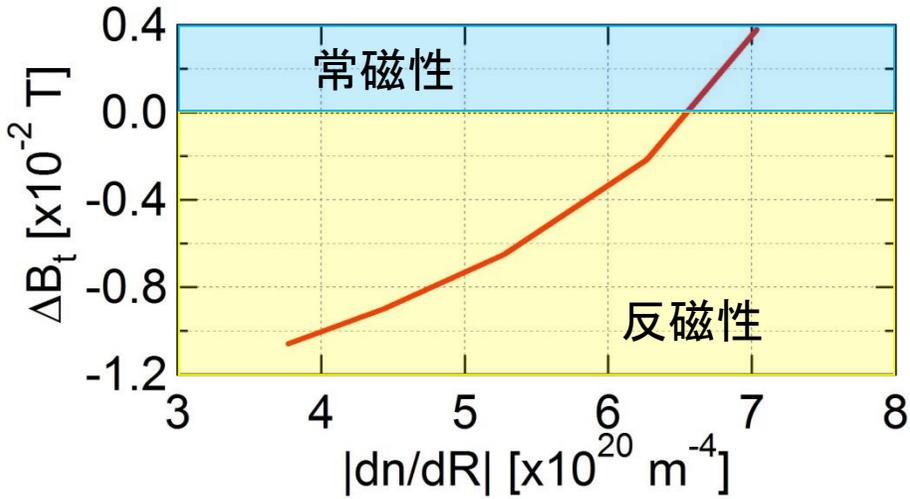
✓ イオンの反磁性ドリフト速度は、セパトリクス付近で $E \times B$ ドリフト速度と向きが同じになる。



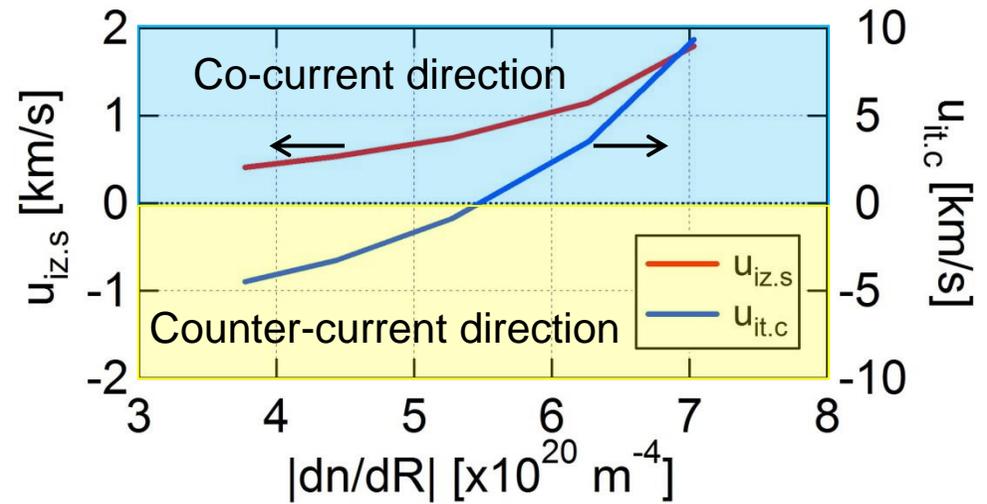
Case III

✓ イオンの反磁性ドリフト速度は、閉じた磁束領域で $E \times B$ ドリフト速度と向きが反対である。

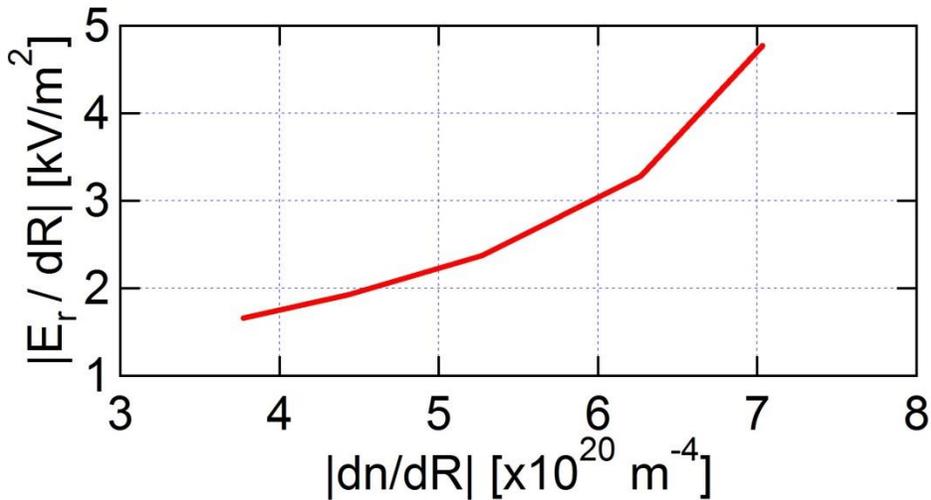
密度勾配の平衡への影響



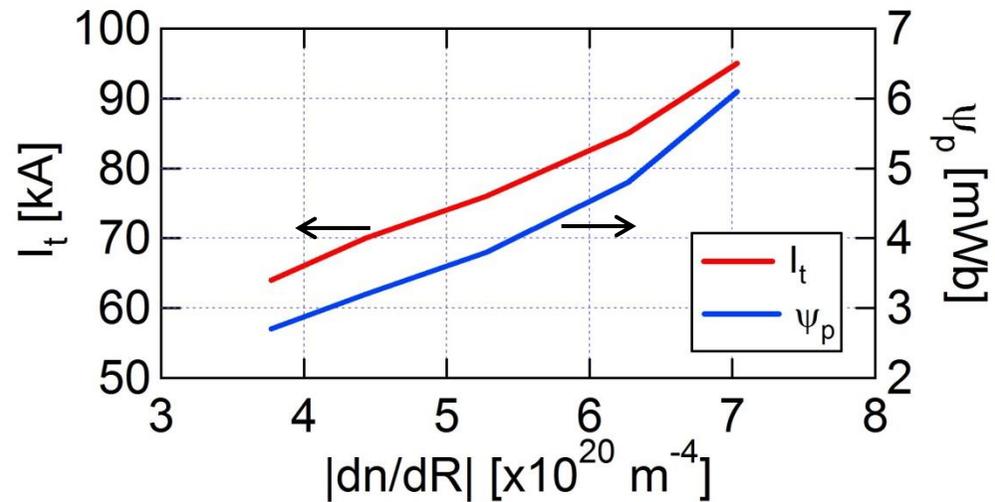
閉じた磁束領域でのトロイダル磁場の変化



ポロイダル流速(セパトリクス)とトロイダル流速(閉じた磁束領域)の変化

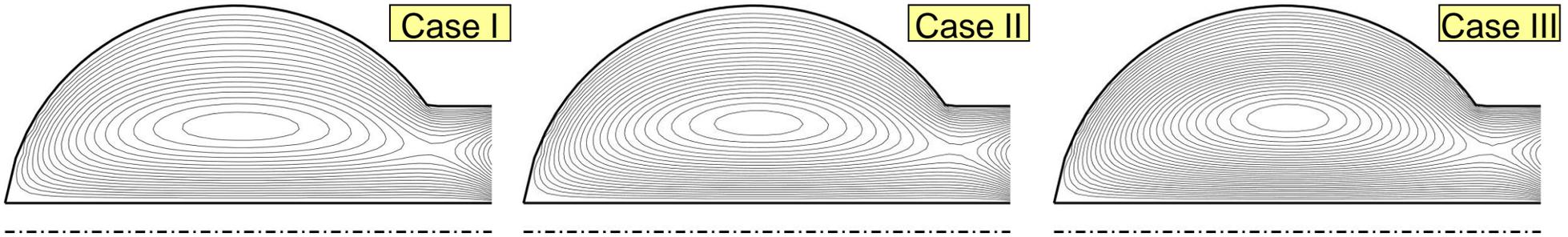


径電場シア(セパトリクス)の変化



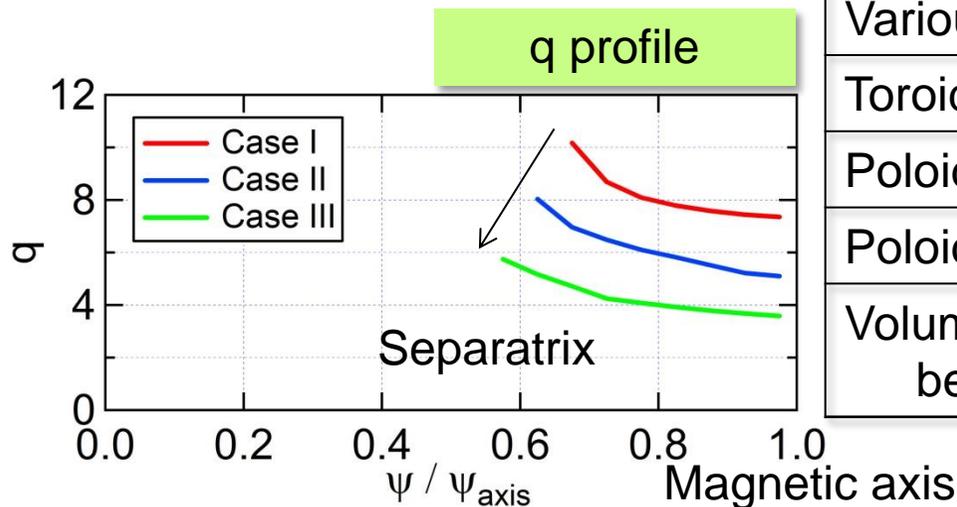
トロイダル電流とポロイダル磁束の変化

ポロイダル磁束の等高線と安全係数



密度勾配の増加とともに閉じた磁束領域でトロイダルイオン流速 (トロイダル電流)が増大し, 閉じたポロイダル磁束が増大する.

q 値はポロイダル磁束の増大とともに低下する.



Various values	Case I	Case II	Case III
Toroidal current I_t	70 kA	76 kA	85 kA
Poloidal current I_p	13 kA	17 kA	22 kA
Poloidal flux ψ_p	3.2 mWb	3.8 mWb	4.8 mWb
Volume average beta $\langle \beta \rangle$	0.791	0.786	0.777

マルチパルス同軸ヘリシティ入射によるSTの2流体平衡遷移について調べた.

- 密度勾配の増大とともに、電流と同じ向きのイオンのポロイダル流速が、セパトリクス付近で増大し、シアが強化される。
→ トロイダル磁場は閉じた磁束領域で反磁性から常磁性になる.
- イオンのトロイダル流速は閉じた磁束領域で電流と反対の向きから同じ向きの方向へ増大する.
- 径電場シアがセパトリクス付近で強化され、磁気力 $1/\epsilon u_t B_z$ に強く依存する.
- 2流体効果はイオンの反磁性効果による.
- イオンの圧力勾配がセパトリクス付近で増大するにつれて、イオンの反磁性ドリフト速度は、 $E \times B$ ドリフト速度と同じ向きに変化する.