

NIFS 共同研究研究会 : 「ヘリカル磁場によるプラズマ閉じ込めの物理」

NIFS 共同研究研究会 : 「閉じ込め周辺領域の科学」

核融合フォーラム物理クラスター : 「周辺ペDESTALサブクラスター会合」

核融合研, 2005/02/23 - 24

境界輸送障壁のモデリング

福山 淳
京大工

- 輸送モデリング
- TASK/TX: 流体型輸送モデリング
- 周辺部輸送障壁
- ヘリカル系への適用
- まとめと今後の課題

輸送モデリング

- トロイダルプラズマにおける輸送現象の解析レベル:
 - **TASK/TR**: 拡散型輸送方程式:
 - 勾配と流束の関係：運動方程式の定常解
 - 従来からの輸送シミュレーション
 - **TASK/TX**: 流体型輸送方程式:
 - 磁気面平均された多流体方程式
 - プラズマ回転を含めた過渡応答の解析
 - **TASK/FP**: 運動論的輸送方程式:
 - 軌道平均された Fokker-Plank 方程式
 - 運動量分布関数の変形

境界輸送障壁形成のモデリング

- E_r の形成

- 径方向の力の釣り合い

$$E_r = -\frac{1}{n_s e_s} \frac{dp_s}{dr} + v_{\theta s} B_\phi - v_{\phi s} B_\theta$$

- 分岐

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_0 \epsilon_\perp}{e} \frac{\partial E_r}{\partial t} = & \Gamma_{e-i}^{\text{turbulence}} - \Gamma_i^{\text{loss cone}} - \Gamma_i^{\text{bulk viscosity}} - \Gamma_i^{\text{Raynolds stress}} \\ & - \Gamma_i^{\text{neoclassical}} + \Gamma_e^{\text{neoclassical}} - \Gamma_i^{\text{charge exchange}} \end{aligned}$$

- 過渡的な現象の取り扱い：運動方程式を含めた解析が必要

境界輸送障壁形成のモデリング (2)

- コアと SOL を含めた輸送シミュレーション
- セパト릭スの役割
 - 閉じた磁気面 \iff 壁につながる開いた磁力線
 - 支配的な輸送機構の違い
- 径方向電界
 - ポロイダル回転
 - トロイダル回転
 - 分極電流
 - ポワッソン方程式
- 原子過程
 - 電離 , 荷電交換 , リサイクリング

流体型輸送方程式：TASK/TX

- 1次元輸送コード (TASK/TX) *Ref. Fukuyama et al.*
- 電子とイオンに対する二流体方程式
 - 磁気面平均
 - マクスウェル方程式と結合
 - 中性粒子の拡散方程式
- 新古典輸送
 - ポロイダル粘性項を含めると
 - 拡散，電気抵抗，自発電流，ウェアピンチ
- 乱流輸送
 - 電流拡散性バルーニングモード乱流モデル (CDBM)
 - ポロイダル運動量の交換による両極性拡散 ⇒ 粒子拡散
 - 乱流粘性
 - 乱流熱拡散

モデル方程式 (1)

- 流体方程式 : (電子とイオン)

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_s u_{sr}) + S_s$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_s n_s u_{sr}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m_s n_s u_{sr}^2) + \frac{1}{r} m_s n_s u_{s\theta}^2 + e_s n_s (E_r + u_{s\theta} B_\phi - u_{s\phi} B_\theta) - \frac{\partial}{\partial r} n_s T_s$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_s n_s u_{s\theta}) = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 m_s n_s u_{sr} u_{s\theta}) + e_s n_s (E_\theta - u_{sr} B_\phi) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 n_s m_s \mu_s \frac{\partial}{\partial r} \frac{u_{s\theta}}{r} \right)$$

$$+ F_{s\theta}^{\text{NC}} + F_{s\theta}^{\text{C}} + F_{s\theta}^{\text{W}} + F_{s\theta}^{\text{X}} + F_{s\theta}^{\text{L}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_s n_s u_{s\phi}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m_s n_s u_{sr} u_{s\phi}) + e_s n_s (E_\phi + u_{sr} B_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r n_s m_s \mu_s \frac{\partial}{\partial r} u_{s\phi} \right)$$

$$+ F_{s\phi}^{\text{C}} + F_{s\phi}^{\text{W}} + F_{s\phi}^{\text{X}} + F_{s\phi}^{\text{L}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} n_s T_s = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left(\frac{5}{2} u_{sr} n_s T_s - n_s \chi_s \frac{\partial}{\partial r} T_e \right) + e_s n_s (E_\theta u_{s\theta} + E_\phi u_{s\phi})$$

$$+ P_s^{\text{C}} + P_s^{\text{L}} + P_s^{\text{H}}$$

モデル方程式 (2)

- 中性粒子輸送

$$\frac{\partial n_0}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r D_0 \frac{\partial n_0}{\partial r} \right) + S_0$$

- マクスウェル方程式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_r) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_s e_s n_s$$

$$\frac{\partial B_\theta}{\partial t} = \frac{\partial E_\phi}{\partial r}, \quad \frac{\partial B_\phi}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial E_\theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial r} B_\phi - \mu_0 \sum_s n_s e_s u_{s\theta}, \quad \frac{1}{c^2} \frac{\partial E_\phi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\theta) - \mu_0 \sum_s n_s e_s u_{s\phi}$$

輸送モデル (1)

- 新古典輸送

- プラズマのポロイダル回転に伴う粘性力
- バナープラトー領域：

$$F_{s\theta}^{\text{NC}} = - \sqrt{\pi} q^2 n_s m_s \frac{v_{\text{Ts}}}{qR} \frac{v_s^*}{1 + v_s^*} u_{s\theta}$$

$$v_s^* \equiv \frac{v_s q R}{\epsilon^{3/2} v_{\text{Ts}}}$$

- このポロイダル粘性力により

- 新古典拡散
- 新古典電気抵抗
- 自発電流
- ウェアピンチ

輸送モデル (2)

- 乱流拡散

- 乱流揺動電場を通じた電子とイオンのポロイダル運動量交換
- 両極性粒子束 (電子粒子束 = イオン粒子束)

$$F_{i\theta}^W = - F_{e\theta}^W$$
$$= - ZeB_\phi n_i D_i \left[-\frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dr} + \frac{Ze}{T_i} E_r - \left\langle \frac{\omega}{m} \right\rangle \frac{ZeB_\phi}{T_i} - \left(\frac{\mu_i}{D_i} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{T_i} \frac{dT_i}{dr} \right]$$

- 垂直粘性

- 非両極性粒子束 (電子粒子束 \neq イオン粒子束) $\mu_s = \text{constant} \times D$

- 拡散係数

- 電流拡散性バルーニングモード乱流輸送モデル

SOL プラズマのモデリング

- 磁力線に沿った粒子・運動量・熱損失

- 減衰時間

$$\nu_L = \begin{cases} 0 & (0 < r < a) \\ \frac{C_s}{2\pi r R \{1 + \log[1 + 0.05/(r - a)]\}} & (a < r < b) \end{cases}$$

- 粒子源

$$S_e = n_0 \langle \sigma_{\text{ion}} v \rangle n_e - \nu_L (n_e - n_{e,\text{div}})$$

- ダイバータからのリサイクリング

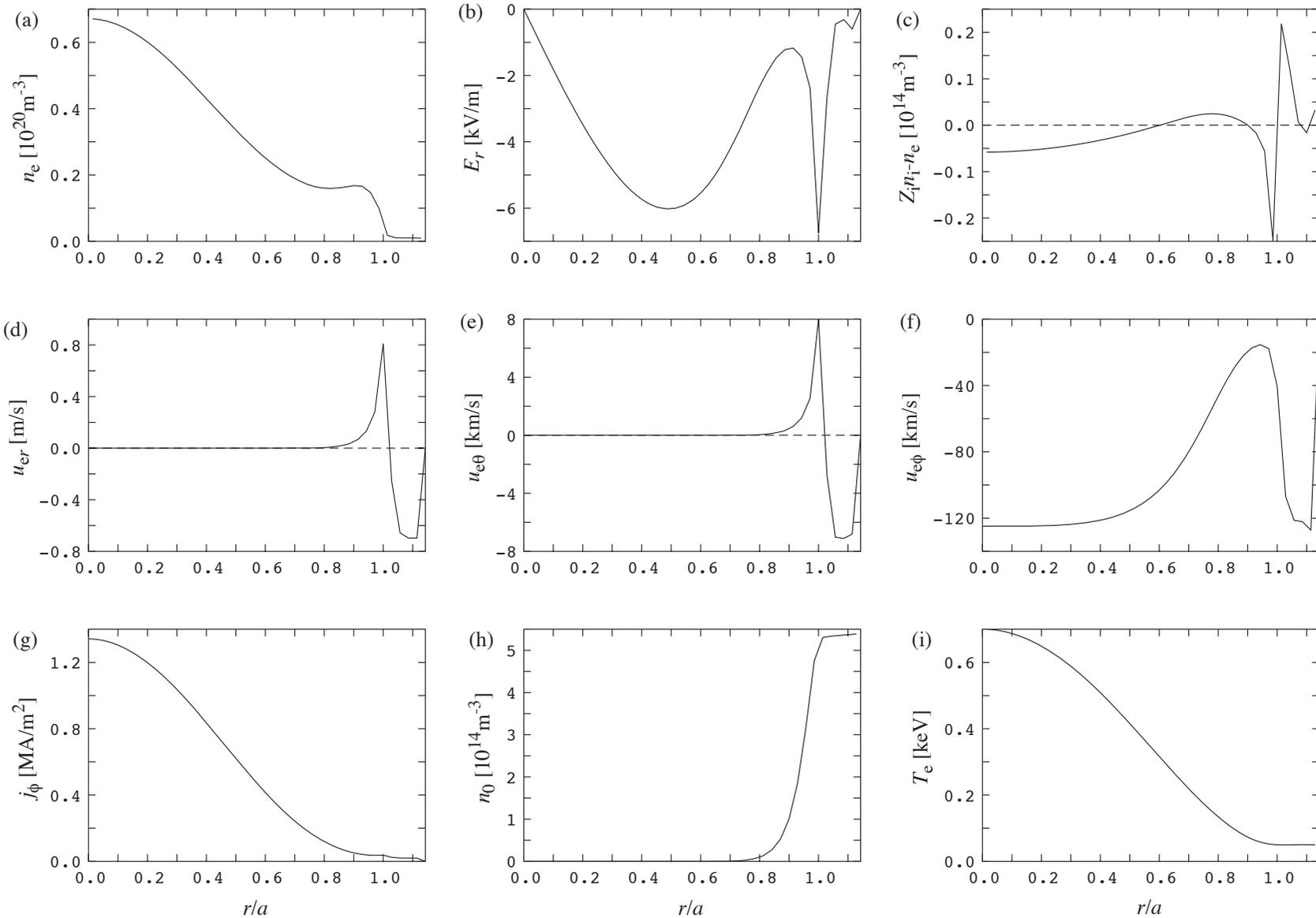
- リサイクリング率: $\gamma_0 = 0.8$

- 中性粒子源

$$S_0 = \frac{\gamma_0}{Z_i} \nu_L (n_e - n_{e,\text{div}}) - \frac{1}{Z_i} n_0 \langle \sigma_{\text{ion}} v \rangle n_e + \frac{P_b}{E_b}$$

- 壁からのガスパフ

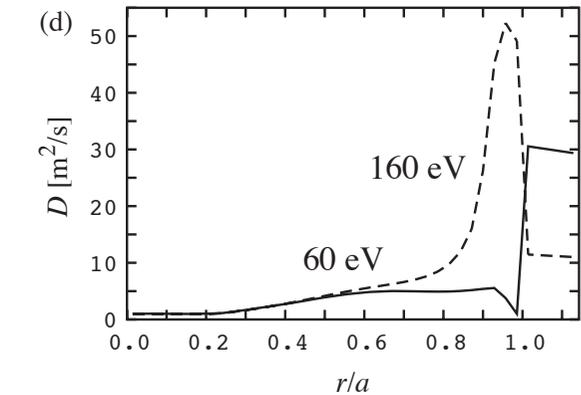
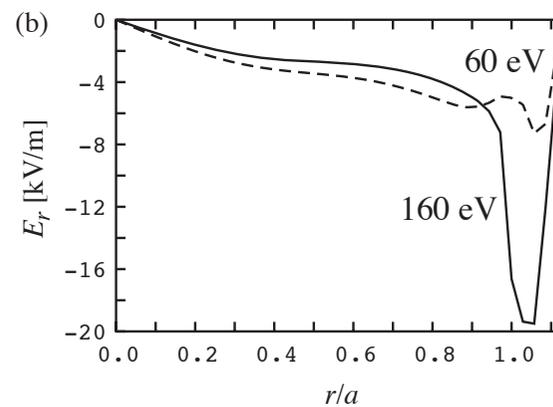
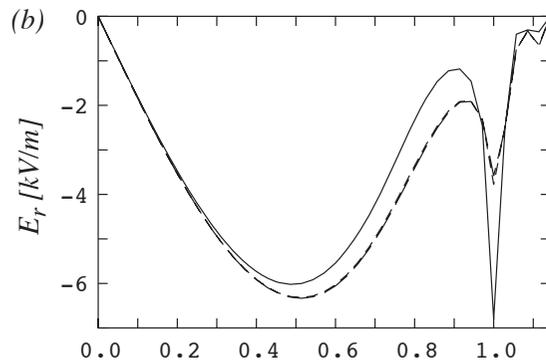
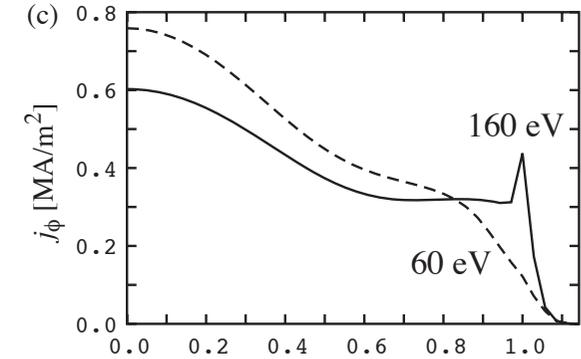
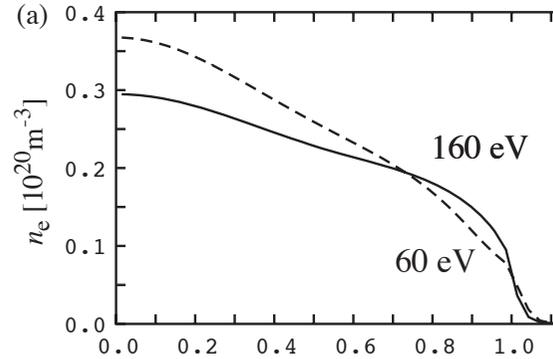
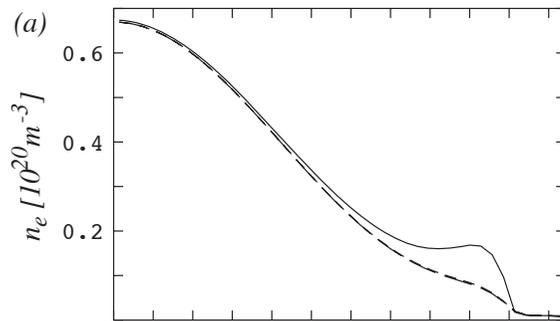
典型的な径方向分布（乱流輸送なし）



典型的な径方向分布（乱流輸送あり）

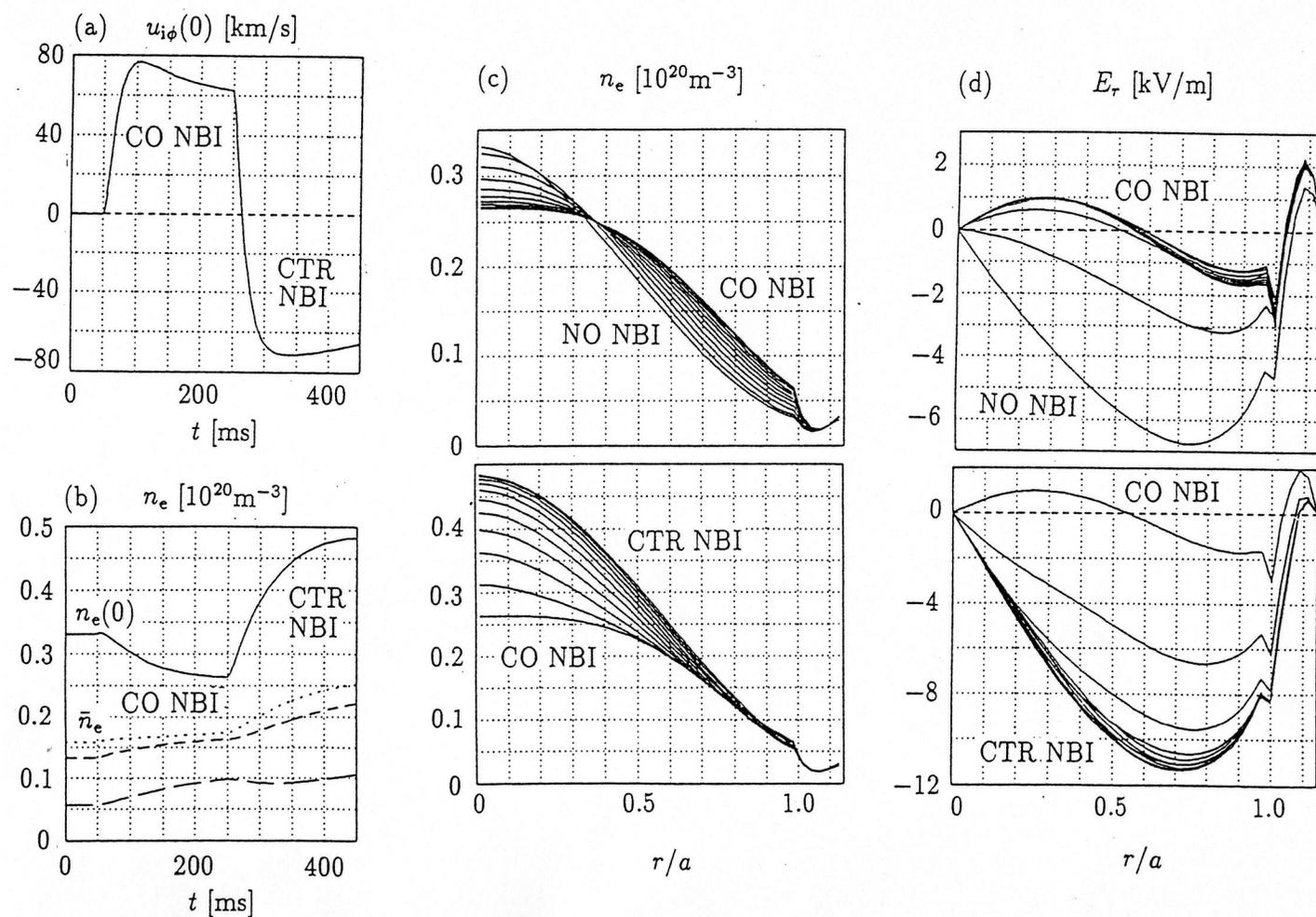
D_{TB} あり / なし

境界部温度に対する依存性



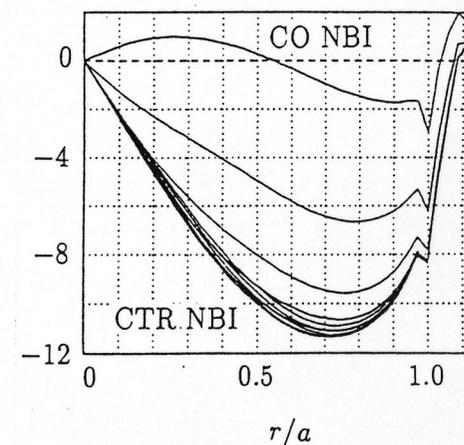
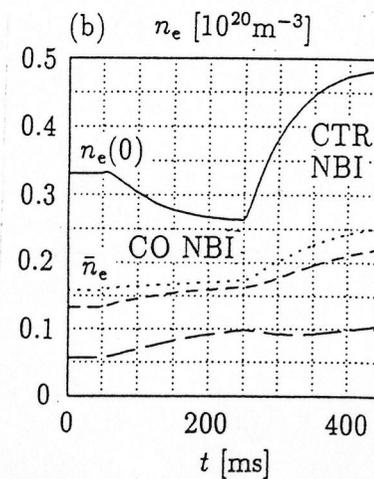
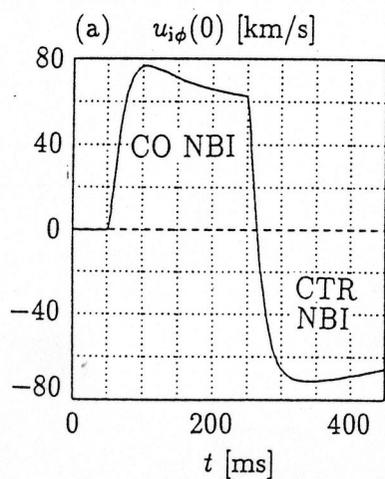
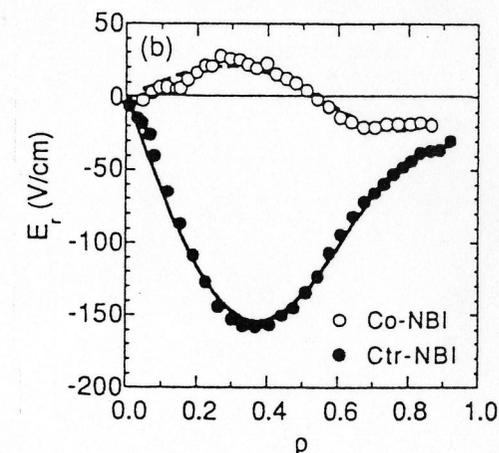
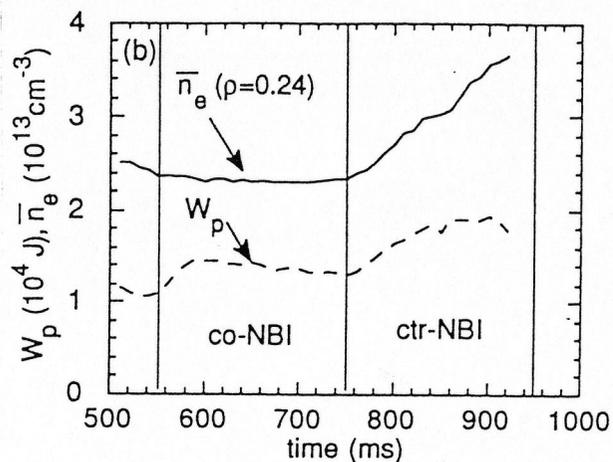
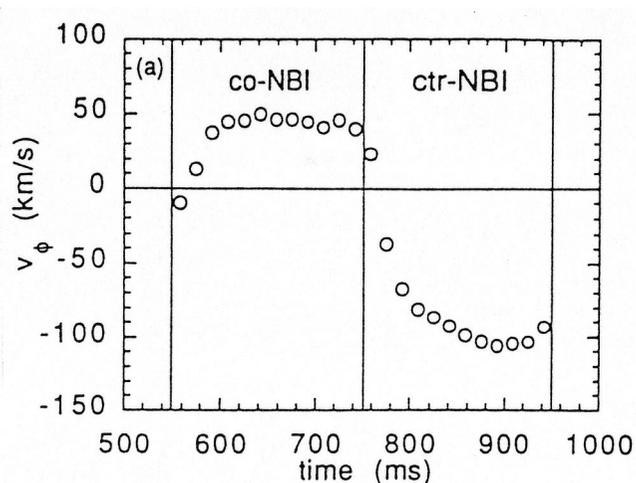
回転と径方向電界を含めた輸送シミュレーション

- **JFT-2M parameter**: NBI co-injection \rightarrow counter-injection
- Toroidal rotation \Rightarrow Negative $E_r \Rightarrow$ Density peaking
- **TASK/TX**: Particle Diffusivity: $0.3 \text{ m}^2/\text{s}$, Ion viscosity: $10 \text{ m}^2/\text{s}$



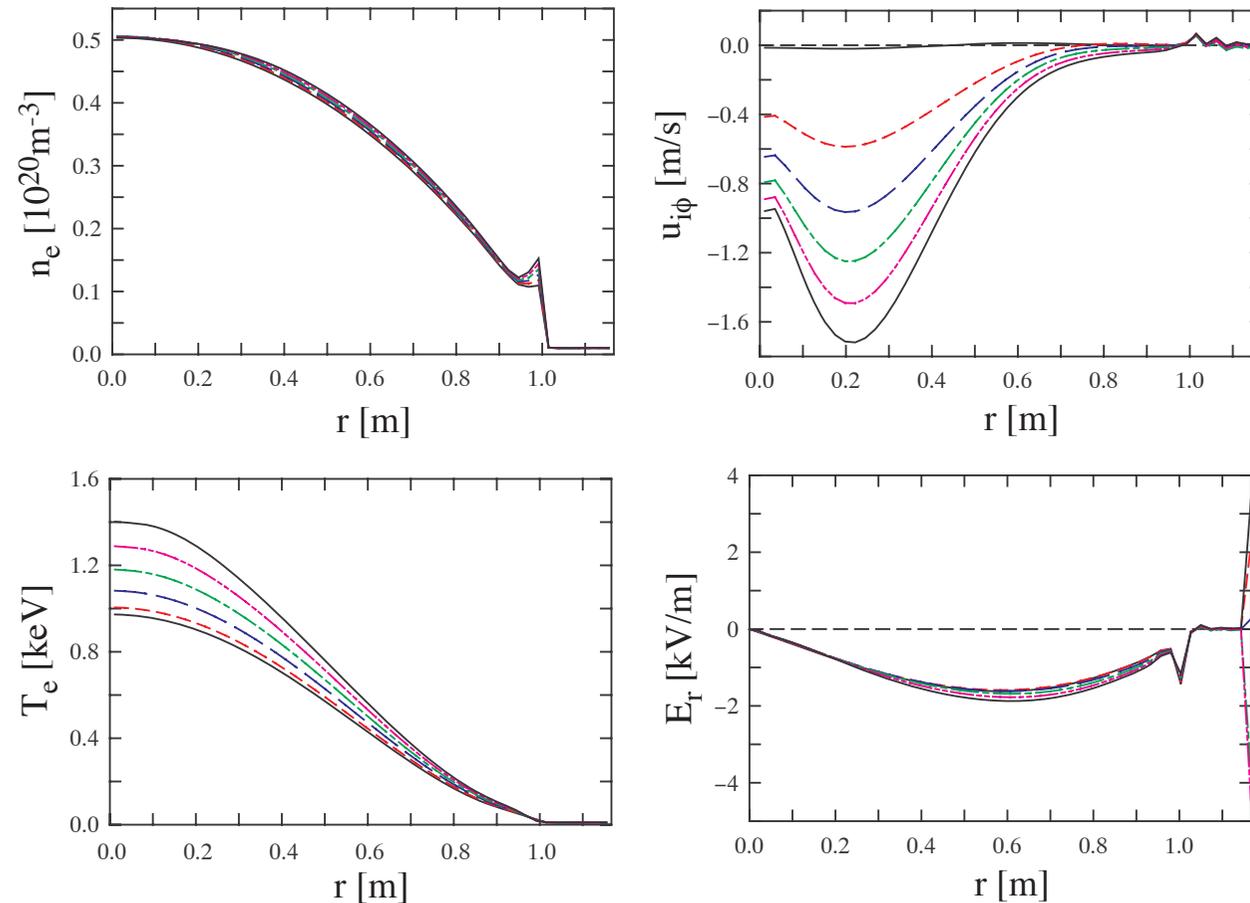
JFT-2M 実験との比較

- **JFT-2M Experiment: Ida et al.: Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 182**
- Good agreement with experimental observation



ヘリカルプラズマにおける輸送モデリング

- トロイダル方向の新古典粘性
- **NBI 加熱** ($P = 5 \text{ MW}$) : トカマクに比べてはるかに遅い回転



- 電子ルートへの遷移
- 周辺部の磁気面の壊れた領域のモデリング : D_M

まとめと今後の課題

- トロイダルプラズマにおいて、プラズマのトロイダル回転、ポロイダル回転、径方向電界の形成を含めた輸送モデリングを行うため、**TASK/TX**コードを開発している。このコードでは、磁気面平均された多流体方程式を用いて、さまざまな輸送機構を統一的に取り入れることができる。
- **周辺輸送障壁形成**：トカマクにおけるコアプラズマと周辺プラズマを含めた解析により、セパトリクス近傍に径方向電界のピークが現れ、径方向輸送を抑制することが示された。
- **ヘリカルプラズマへの適用**：ヘリカル配位における輸送を取り扱うため、トロイダル方向の新古典粘性を取り入れた解析を行った。
- **今後の課題**
 - 非線形新古典粘性を取り入れた周辺輸送障壁形成の動的解析
 - ヘリカルプラズマにおける新古典輸送の解析
(電子ルート/イオンルートの空間構造と動的解析)
 - **Stochastic Layer** における輸送のモデリング