

# トカマクにおける 内部輸送障壁形成の 輸送シミュレーション

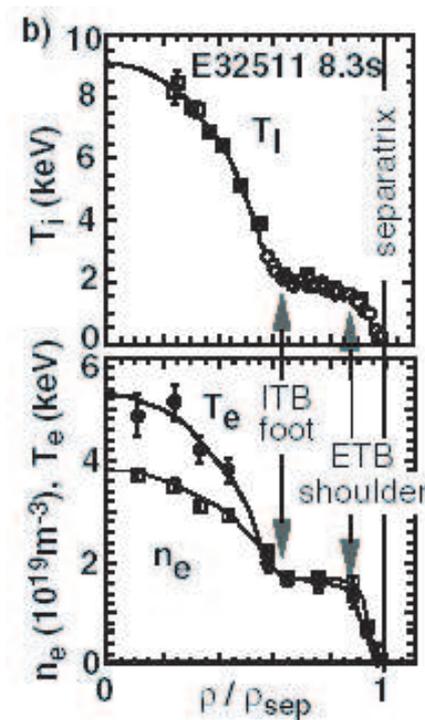
本多 充, 福山 淳

京都大学大学院工学研究科

- ・トロイダル回転を伴った平衡解析
- ・平衡を含めた輸送シミュレーション

# はじめに

- 磁気閉じ込め方式による核融合炉の実現  
⇒ 高いエネルギー閉じ込め性能が必要
- 高閉じ込め状態 ⇒ 輸送係数の減少
  - 高ポロイダルベータモード (高  $\beta_p$  モード)
  - 負磁気シア配位 → 電流ホール形成
- 輸送係数の減少 ⇒ 内部輸送障壁 (ITB) の形成
- プラズマ回転による乱流輸送係数の減少
  - トロイダル回転速度シアの増大
  - 径方向電場の発生による  $E \times B$  回転速度シアの増大
- ITB の形成に伴ってトロイダル回転速度シアの増大が観測されている



∴ 平衡・輸送解析においてトロイダル回転を含めることは重要

# Grad-Schlüter-Shafranov 方程式

- MHD 基礎方程式系から、軸対称性、温度  $T$  が  $\psi$  の関数であること及びトロイダル回転を仮定して **Grad-Schlüter-Shafranov** 方程式を導出する。
- **GSS 方程式**

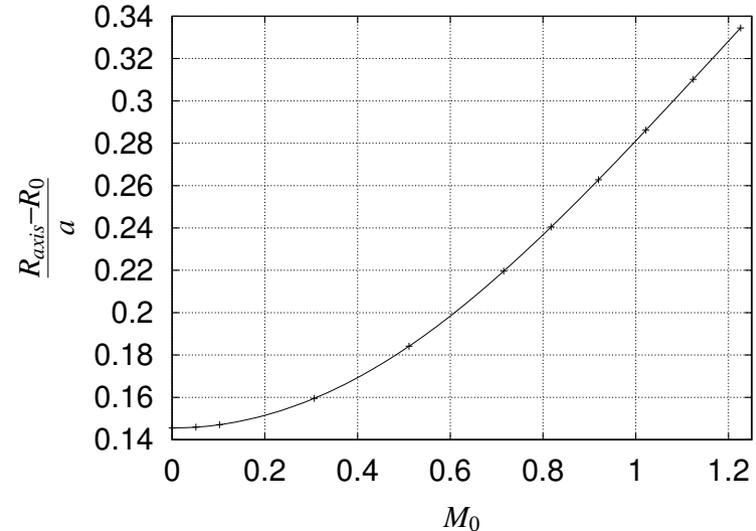
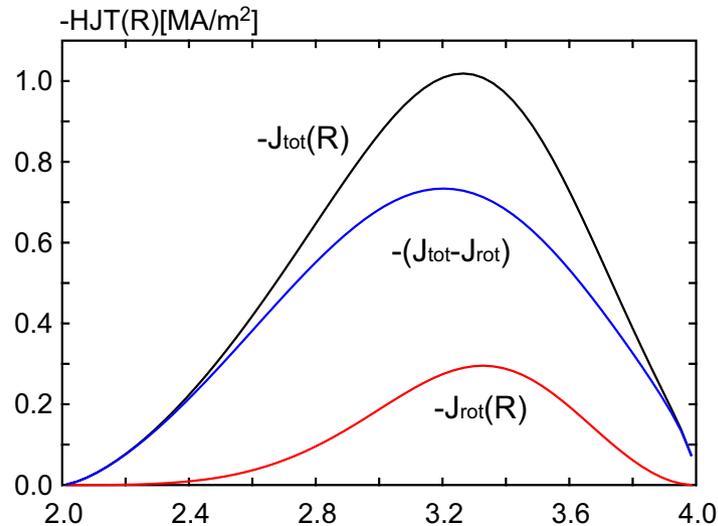
$$R^2 \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \psi}{R^2} \right) + FF' + R^2 \left\{ p' + p \frac{R^2}{2} \left( \frac{m\omega^2}{T} \right)' \right\} \exp \left( \frac{mR^2\omega^2}{2T} \right) = 0$$

$\psi$	トロイダル磁束関数	$T(\psi)$	プラズマ温度
$R$	大半径	$\omega(\psi)$	回転周波数
$p(\psi)$	プラズマ圧力	$B_\phi$	トロイダル磁束密度
$m$	陽子の質量	$F$	$F = B_\phi R$

(参考文献: E.K.MASCHKE and H.PERRIN, *Plasma Phys.* **22** No.6 1980)

# トロイダル回転がプラズマ平衡に及ぼす効果

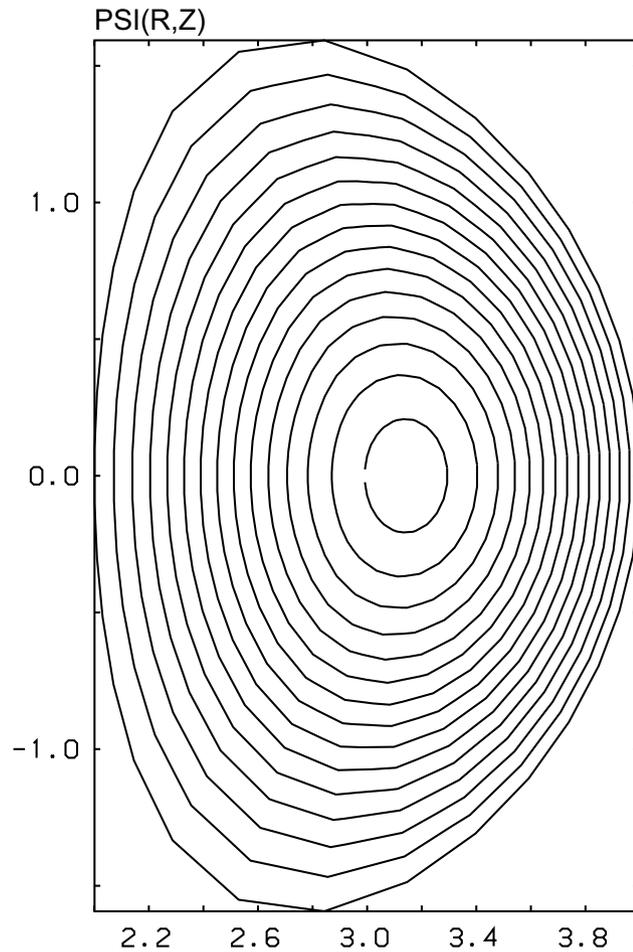
- トロイダル回転速度が増すと、磁気軸が外側にシフトする。



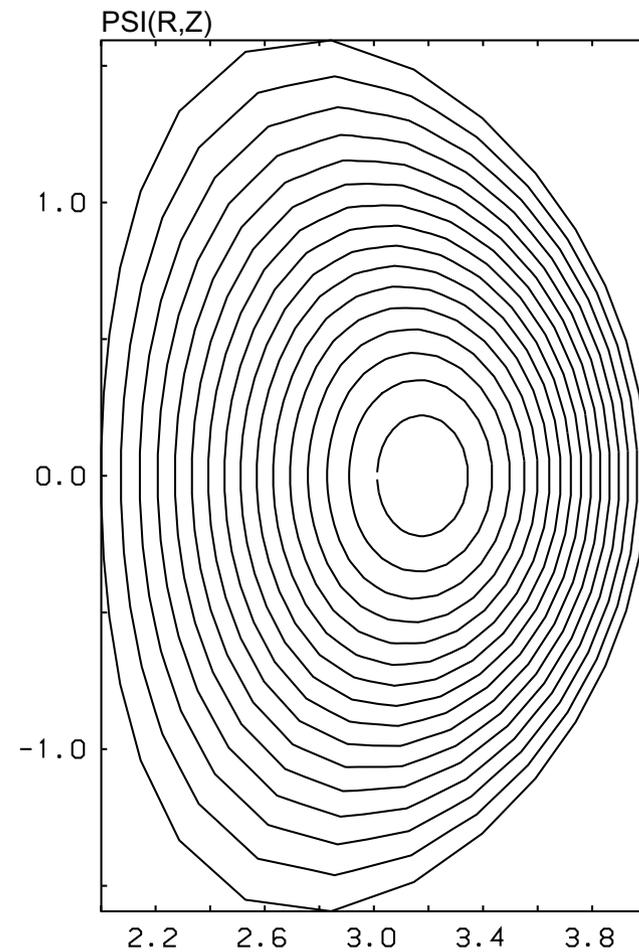
- 解析解との比較： $\omega^2/T = \text{const.}$ ,  $p, T : \psi$  の一次関数  
⇒ 磁気軸位置の誤差 **0.005%**

# 数値計算結果：二次元分布

回転が無い場合とある場合のポロイダル磁束関数  $\psi(R, Z)$  の等高線分布



$$V_{\phi 0} = 0$$



$$V_{\phi 0} = 5 \times 10^5 \text{ m/s}$$

# 輸送シミュレーション

## ● プラズマモデル

● 不純物, 中性粒子の影響は無視し,  $Z_{\text{eff}} = 1$  とおいた.

## ● 拡散型輸送方程式+(高速イオンのエネルギー密度発展方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_s V') = -\frac{\partial}{\partial \rho} \left( V' \langle |\nabla \rho| \rangle n_s V_s - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle D_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho} \right) + S_s V'$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_s T_s V'^{5/3} \right) = -V'^{2/3} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( V' \langle |\nabla \rho| \rangle \frac{3}{2} n_s T_s V_{Es} - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \frac{3}{2} D_s T_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho} - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle n_s \chi_s \frac{\partial T_s}{\partial \rho} \right) + S_E V'^{5/3}$$

$$\frac{\partial B_\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left[ \frac{\eta_{\parallel}}{\mu_0} \frac{F}{V' \langle R^{-2} \rangle} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{V'}{F} \left\langle \frac{|\nabla \rho|^2}{R^2} \right\rangle B_\theta \right) - \frac{\eta_{\parallel}}{F R_0} \frac{\langle |\nabla \rho| \rangle}{\langle R^{-2} \rangle} \langle (J_{CD} + J_{BS}) B \rangle \right]$$

$J_{CD}$  : 外部駆動電流

$J_{BS}$  : ブートストラップ電流

$F$  :  $F = B_\phi R$

$V'$  :  $dV/d\rho$ ,  $V$  はプラズマ体積

$\eta_{\parallel}$  : 抵抗率

$\rho$  : 平均半径

$V_{Es}$  :  $V_{Es} = V_{Ks} + \frac{3}{2} V_s$

# 熱輸送係数と TASK/TR&EQ フローチャート

- 熱拡散係数は、新古典拡散係数  $\chi_{NC}$  と乱流輸送係数  $\chi_{TB}$  の和で表す。

$$\chi_e = \chi_{NC,e} + 12\chi_{TB}$$

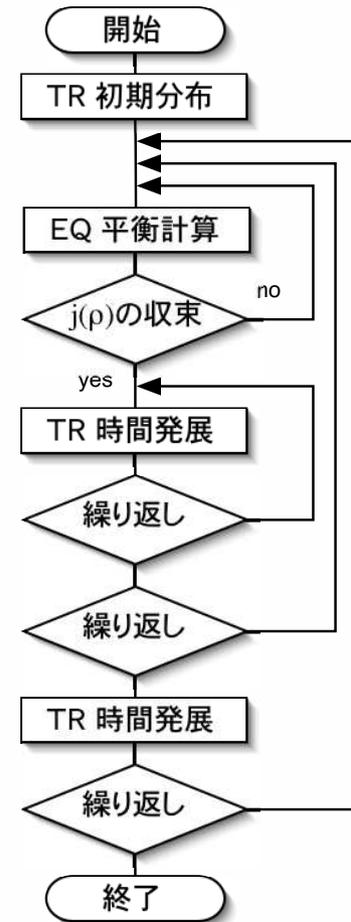
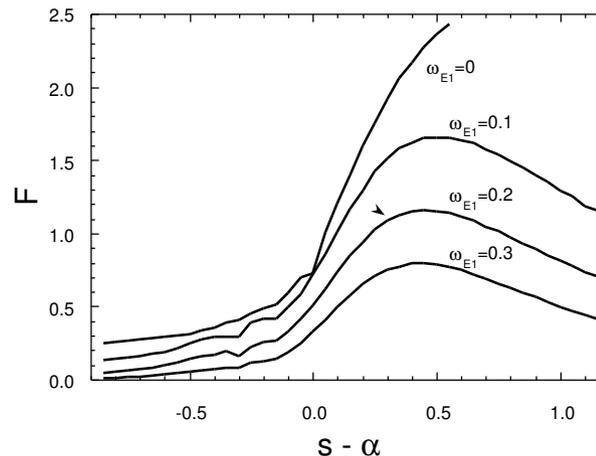
$$\chi_i = \chi_{NC,i} + 12\chi_{TB}$$

- 電流拡散性バルーニングモード (CDBM) モデルによる熱拡散係数

$$\chi_{TB} = F(s, \alpha) \alpha^{3/2} \frac{c^2}{\omega_{pe}^2} \frac{v_A}{qR}$$

磁気シア  $s \equiv \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$

圧力勾配  $\alpha \equiv -q^2 R \frac{d\beta}{dr}$

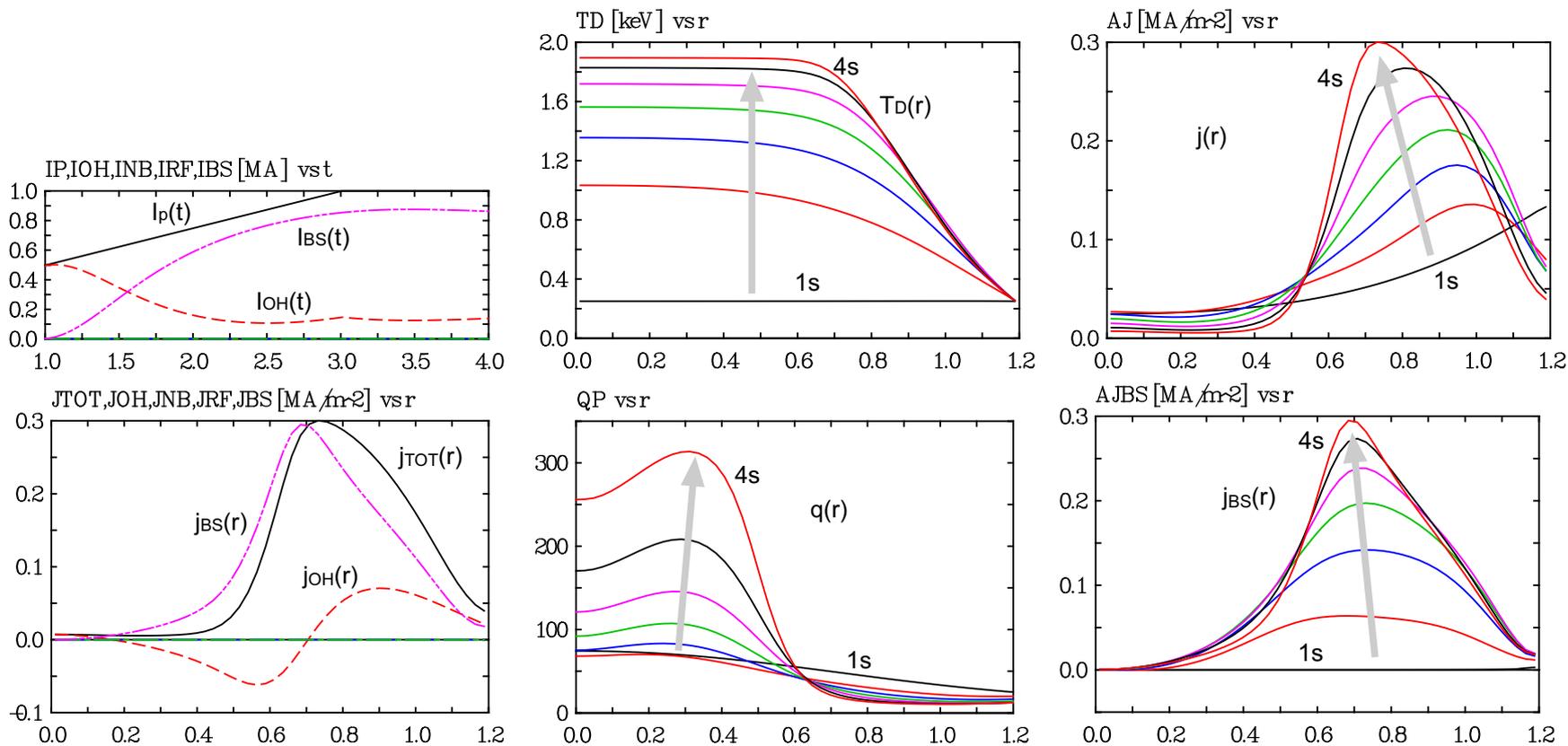


# 電流ホール 1

- 密度分布固定:  $n_e \propto (1 - r^2/a^2)^{1/2}$
- 初期分布:  $T_s(r = 0) = 0.5\text{keV}$ ,  $T_s(r = a) = 0.25\text{keV}$   
 $n_{e,D}(r = 0) = 0.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$
- 平衡は解かず, 輸送のみを解いた.
- 計算方法
  - 初期分布から 1 秒走らせ, その間に電流を 0.1  $\rightarrow$  0.5MA に増やす.
  - 次の 2 秒で電流を 1MA に増やし,  $r = 0.3\text{m}$  に ICRH 5MW の加熱.
  - その後 1 秒走らせた.

# 電流ホール 2

- 加熱を開始すると  $r = 0.7\text{m}$  を ITB の肩とする急峻な温度勾配が形成.
- 電流立ち上げ終了後は全電流の 9 割近くが BS 電流.
- BS 電流が電流ホール形成に重要な役割.

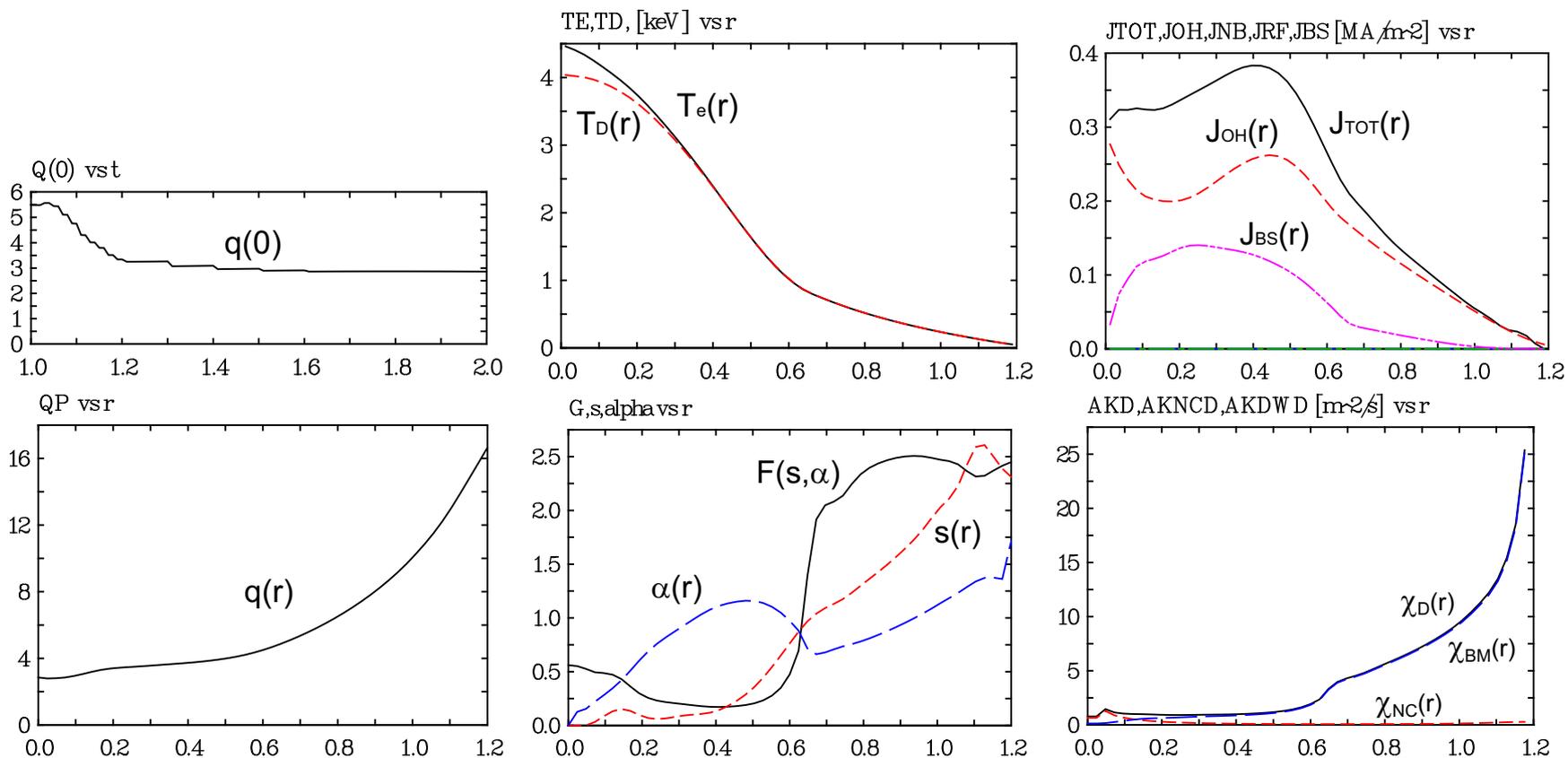


# 高 $\beta_p$ モード1

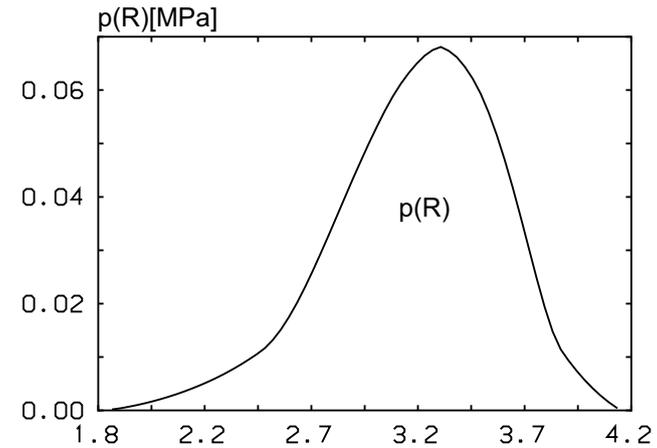
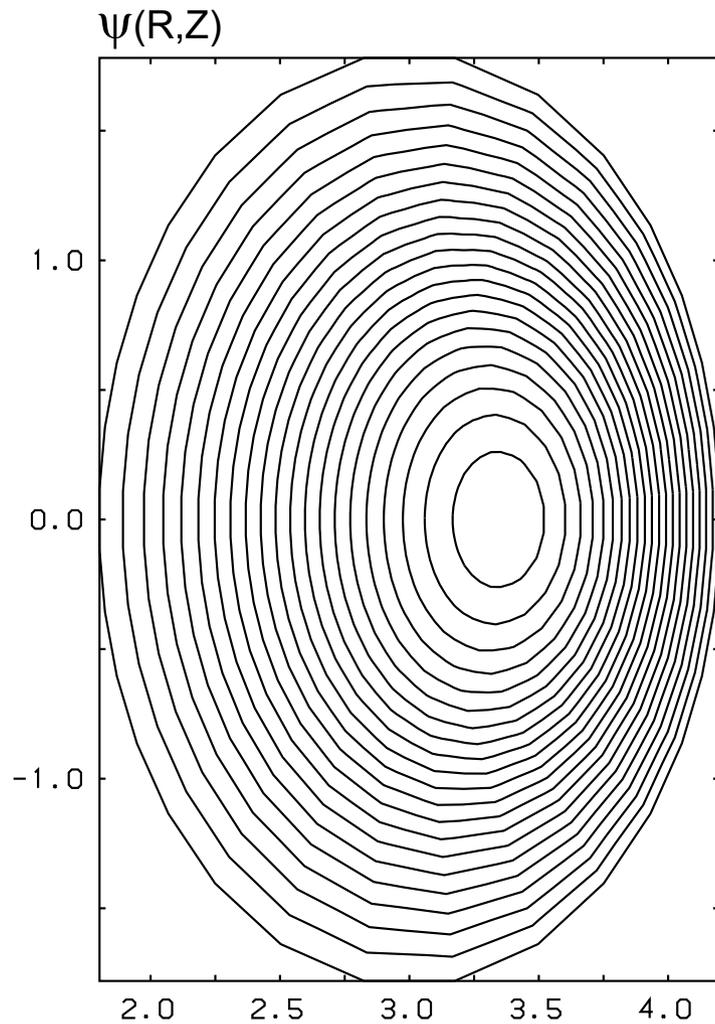
- 密度分布固定:  $n_e \propto (1 - r^2/a^2)^{1/2}$
- 初期分布:  $T_s(r = 0) = 1.0\text{keV}$ ,  $T_s(r = a) = 0.05\text{keV}$   
 $n_{e,D}(r = 0) = 0.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$ ,  $I_p = 1\text{MA}$
- 計算方法
  - 初期分布から  $I_p = 1\text{MA}$  で1秒間走らせておく.
  - その後1秒間  $r = 0.1\text{m}$  に ICRH 13.5MW 加熱.
  - 加熱開始直後など分布変化が急激な時には, 平衡を頻繁に解いている.

# 高 $\beta_p$ モード2

- $r < 0.6$  m で大きな温度勾配や圧力勾配が維持
- BS 電流密度が高くなり,  $q$  分布に平坦部が形成
- 磁気シア  $s$  の低下と圧力勾配  $\alpha$  の増大により  $\chi$  が低下



# 高 $\beta_p$ モード3



$$R_{\text{axis}} : 3.354$$

$$\psi_{\text{axis}} : -5.204 \times 10^{-1}$$

$$\beta_t : 3.964 \times 10^{-3}$$

$$\beta_p : 1.914$$

$$q_{\text{axis}} : 2.794$$

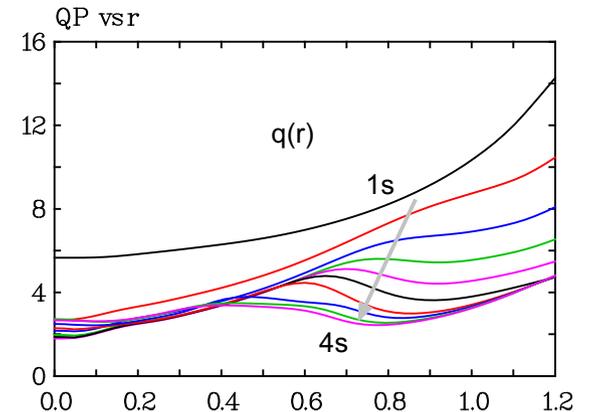
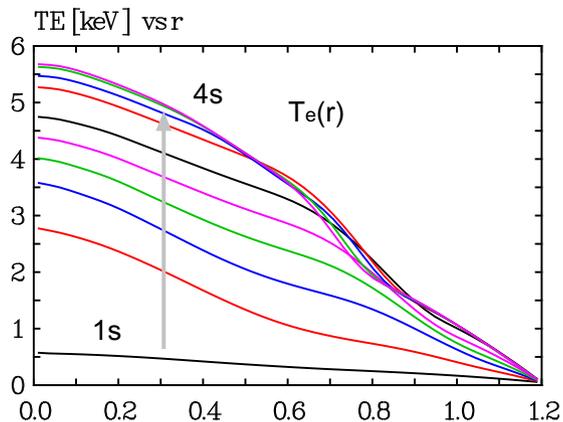
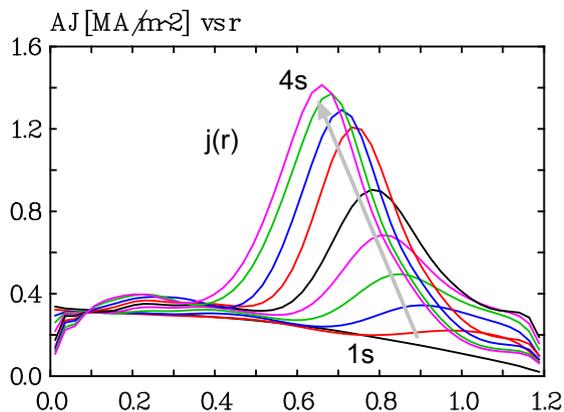
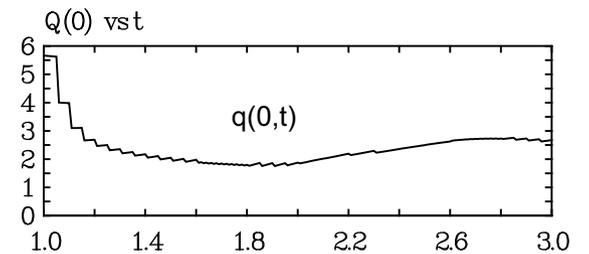
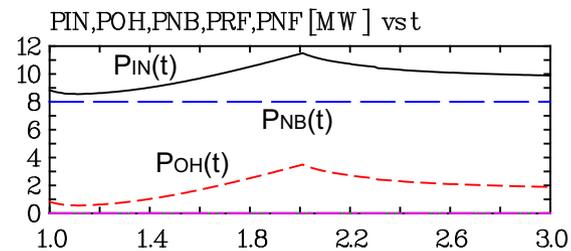
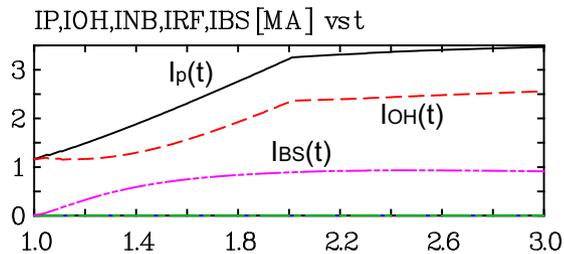
$$q_{\text{surf}} : 17.13$$

# 負磁気シア配位 1

- 密度の発展方程式も解いた.
- 初期分布:  $T_s(r = 0) = 1.0\text{keV}$ ,  $T_s(r = a) = 0.05\text{keV}$   
 $n_{e,D}(r = 0) = 0.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$ ,  
 $n_{e,D}(r = a) = 0.04 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$
- 計算方法
  - 初期分布から  $I_p = 1\text{MA}$  で 1 秒間走らせておく.
  - 軸上に **NBI 8MW** の加熱を開始すると同時に, プラズマ電流を 1 秒間で 1 MA から 3 MA まで増加.
  - その後 1 秒走らせた.
  - 加熱開始直後など分布変化が急激な時には, 平衡を頻繁に解いている.

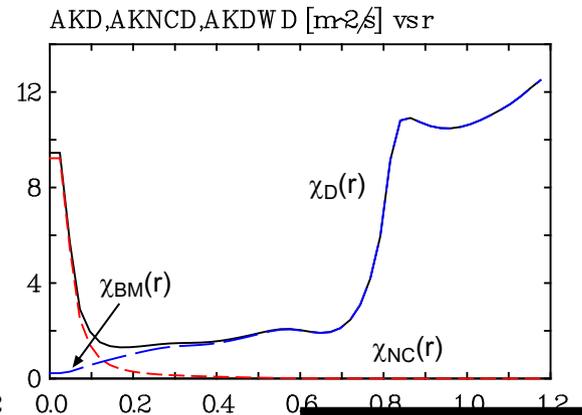
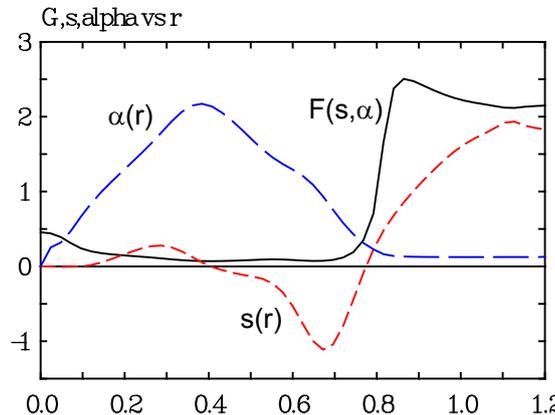
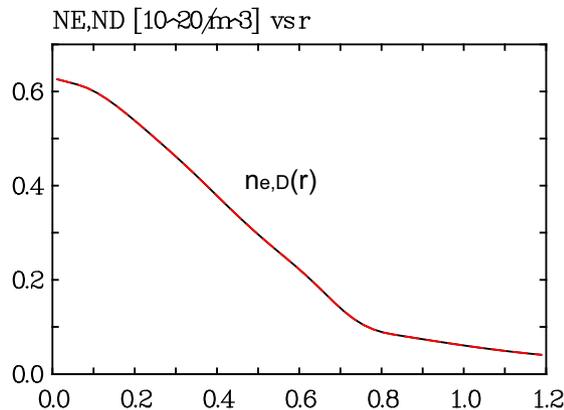
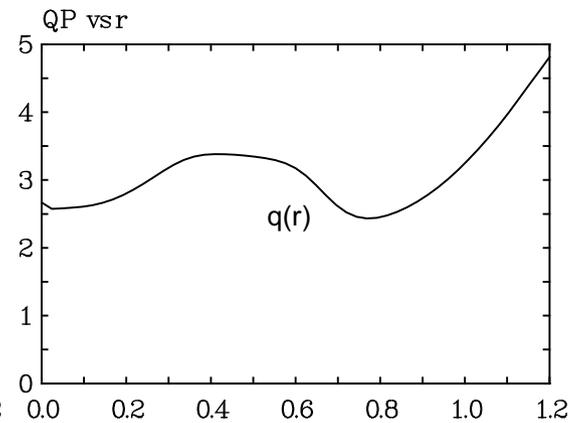
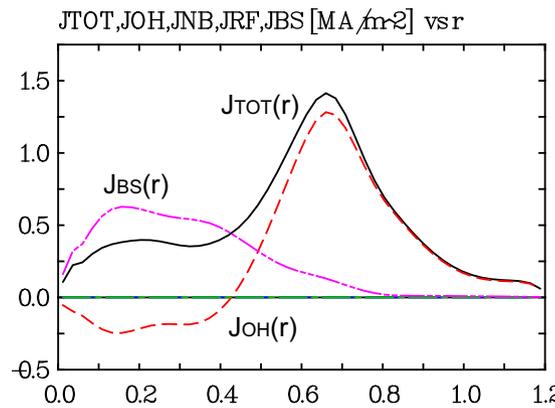
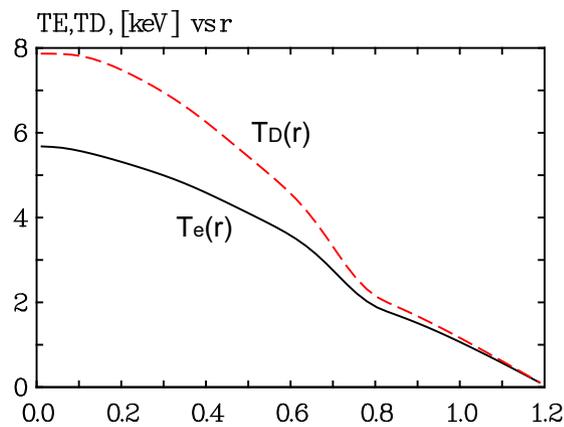
# 負磁気シア配位 2

- 電流立ち上げ → 電流しみ込み
- 負の磁気シア → 大きな温度勾配
- ITB の形成



# 負磁気シア配位 3

- 加熱開始後 2s における径方向分布
- 温度・密度共に ITB が形成
- 負磁気シアと急峻な圧力勾配による  $\chi, D$  の低下



# 実験データを用いたシミュレーション 1

現在の所、以下のデータが読み込み可能で、読み込んだ上でシミュレーションする事ができる。いずれも JT-60U のデータであるが、ITPA データベースのデータも読み込み可能である。

- データ形式：UFILE
- 読み込めるデータ一覧

NE	電子密度	Q	安全係数
TE	電子温度	VOL	プラズマ体積
TI	イオン温度	AREA	プラズマ面積
Q	安全係数	RMJ	主半径
PBE	電子への NBI	GR1	$\langle  \nabla \rho  \rangle$
PBI	イオンへの NBI	GR2	$\langle  \nabla \rho ^2 \rangle$
		RBT	$RB_t$ (欲しいです)

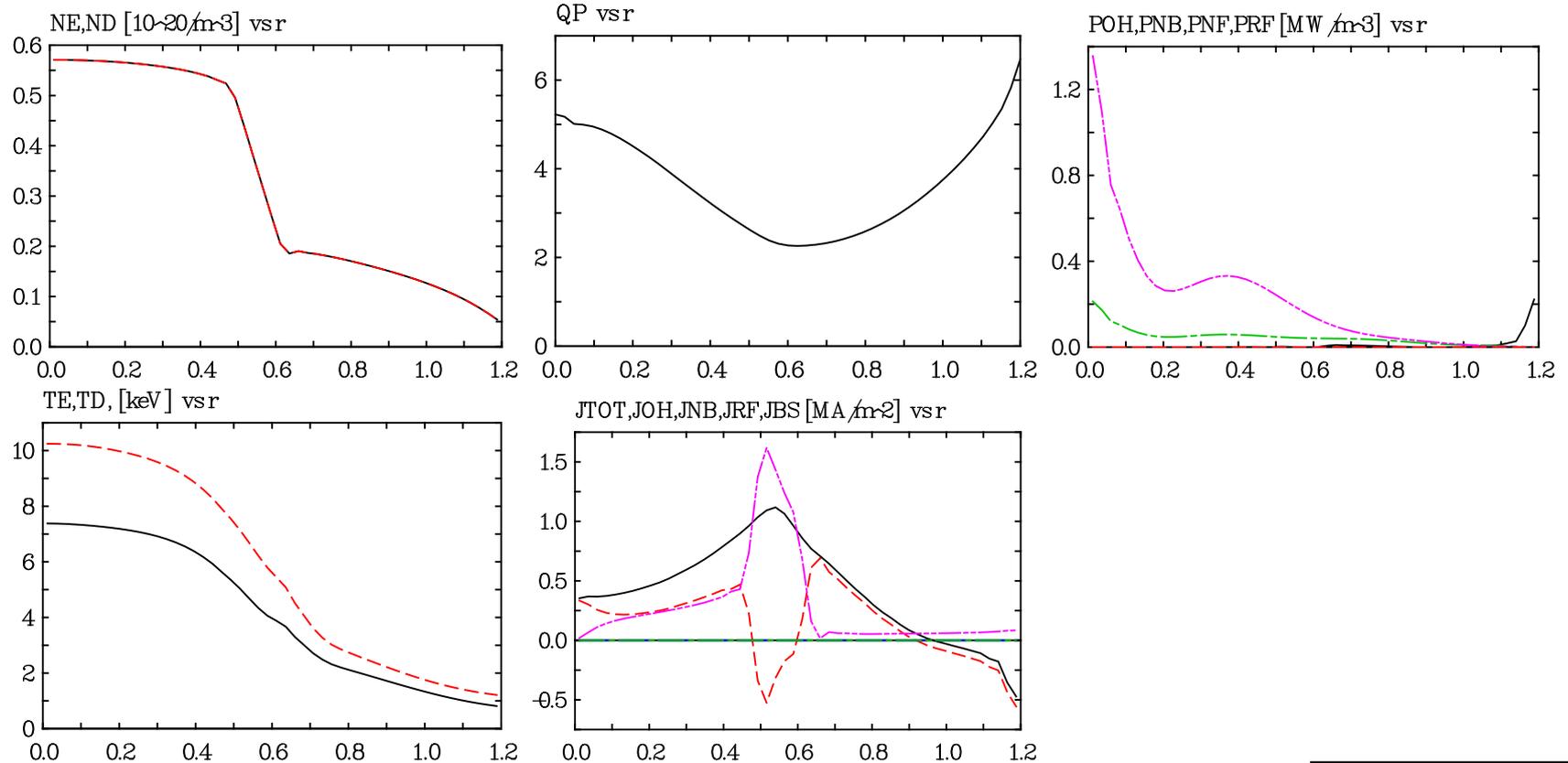
- 以上のデータから初期分布（左半分）やメトリック（右半分）を作る

# 実験データを用いたシミュレーション2

- 輸送単独でも輸送と平衡を組み合わせた形のどちらでも可能。
- 密度は初期分布を読み込んだ状態で固定。
- 温度は、境界での値はデータ値で固定しているが、初期分布をデータそのままにするかこちらで与えた分布にするかは任意。
- 現在の結果
  - 平衡と組み合わせると上手く走らない
    - ⇒ 平衡を計算するところで（外挿関連の）エラーが発生
    - ⇒ 初期分布に無理がある？
    - ⇒ 平衡との連携で未だしっくりこないところがある
    - ⇒ とどのつまり、何を読み込んで何を読み込まなくていいかがはっきりしない
  - 輸送単独では走る ⇒ 次ページ以降

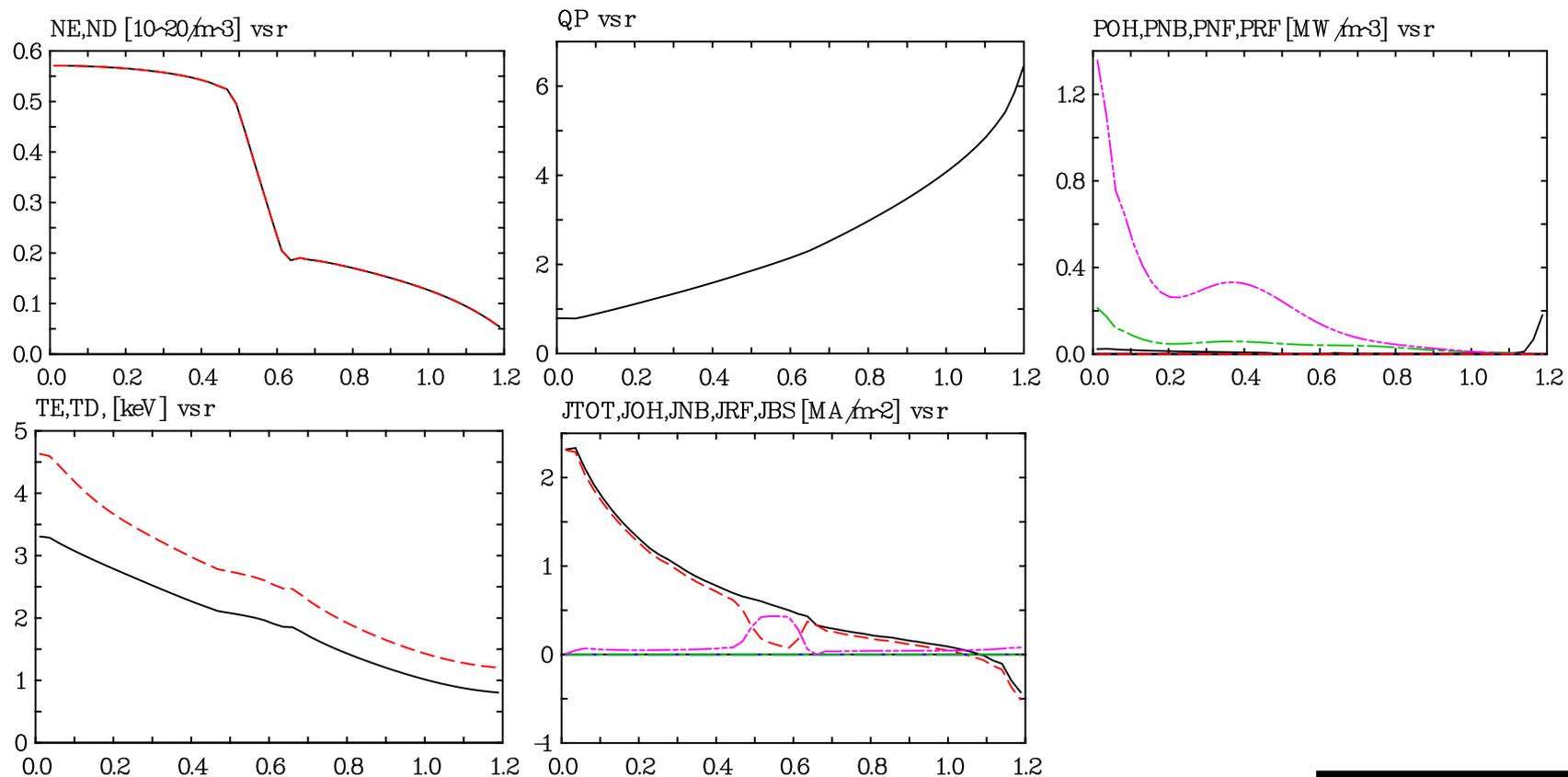
# 開始 0.01 s 後

- 計算開始後 0.01s における径方向分布
- 実験データから読み込んだ温度・密度共に ITB を維持
- 加熱パワーは実験データからの NBI



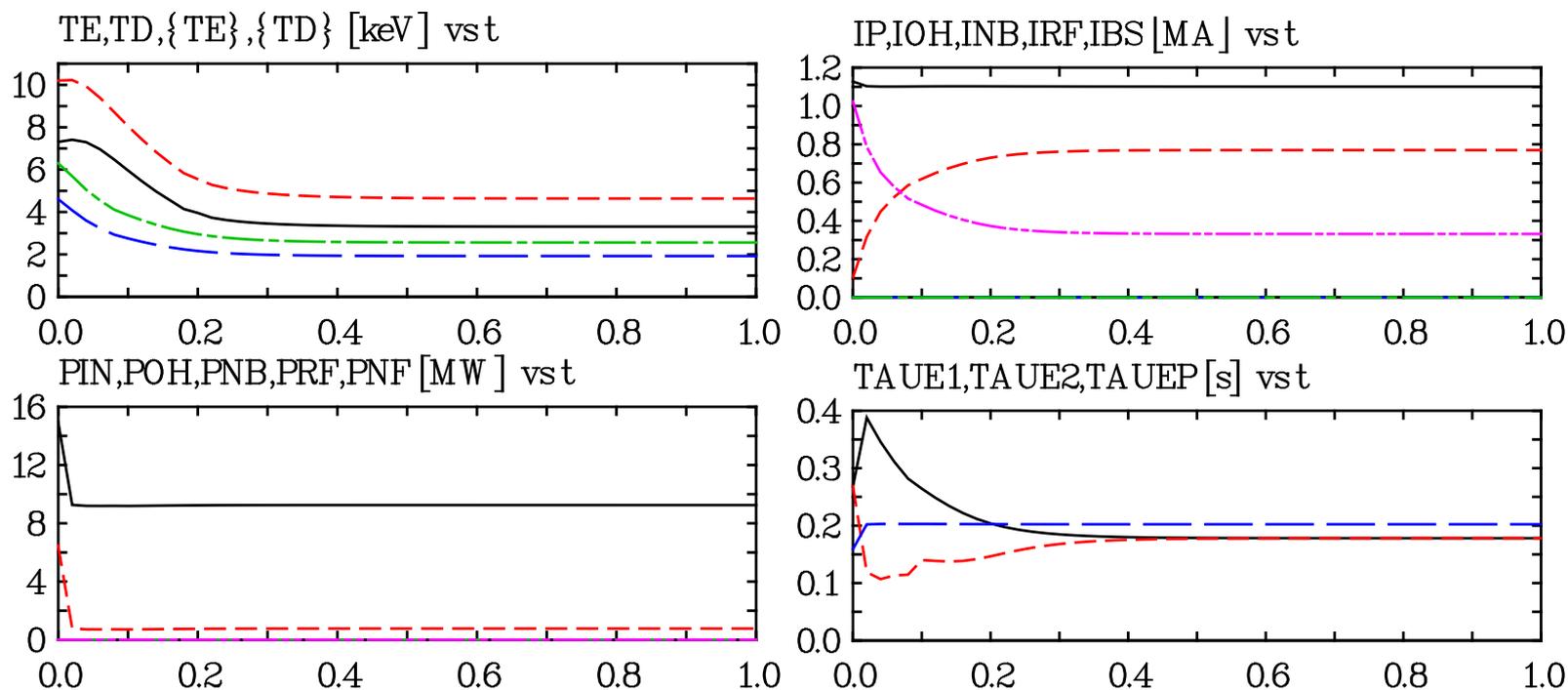
# 開始 1 s 後 1

- 計算開始後 1s における径方向分布
- ITB は消滅  $\implies$  Lモードの様な分布に
- 密度, 加熱パワーは固定



# 開始 1 s 後 2

- 計算開始後 1s までの時間発展
- 開始後 0.2s で一気に温度が下がり，後はほぼ定常
- 開始直後に入力パワー現象  $\implies$  なぜ？



# まとめ

- トロイダル回転の項を加えることによって、剛体回転を伴う遠心力により磁気軸が外側にシフトすることが確かめられた。
- 輸送障壁形成を輸送シミュレーションで再現した。
  - 電流ホール
  - 高  $\beta_p$  モード
  - 負磁気シア配位
- 平衡と組み合わせることによって、より現実的なシミュレーションが可能になった。
- 今後の課題
  - 平衡コードの改良と計算範囲の拡大。
  - 輸送コードにトロイダル回転の効果を加える。
  - ITER 分布データベースを用いて実験データと比較する（進行中）。
  - 不純物，中性粒子の効果を加えたモデルの改良を行う。