

2004/03/30

日本物理学会領域 2 シンポジウム 30aXH-2

九州大学箱崎キャンパス

ITER 燃焼プラズマ研究の新領域

ITER 燃焼プラズマの閉じ込めと輸送の新領域

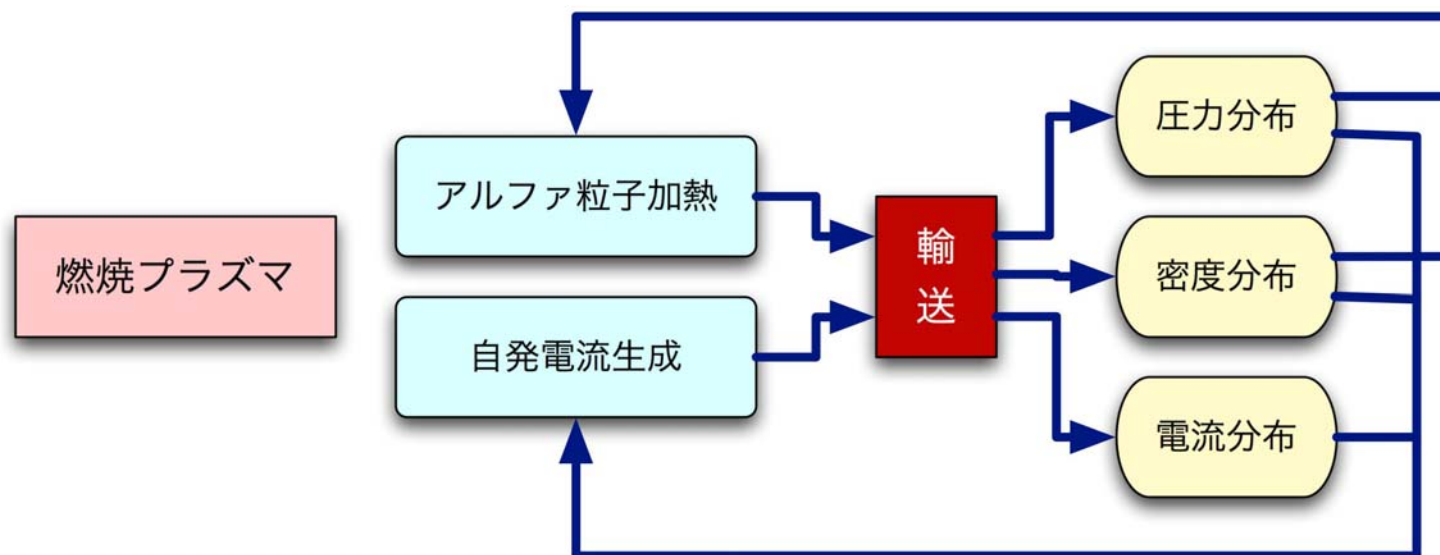
福山 淳 (京大工)
洲鎌英雄 (核融合研)
矢木雅敏 (九大応力研)
岸本泰明 (原研那珂研)

内容

- 燃焼プラズマにおける輸送
- 乱流輸送
- 構造形成
- 複合ダイナミクス
- まとめ

ITER 燃焼プラズマにおける輸送

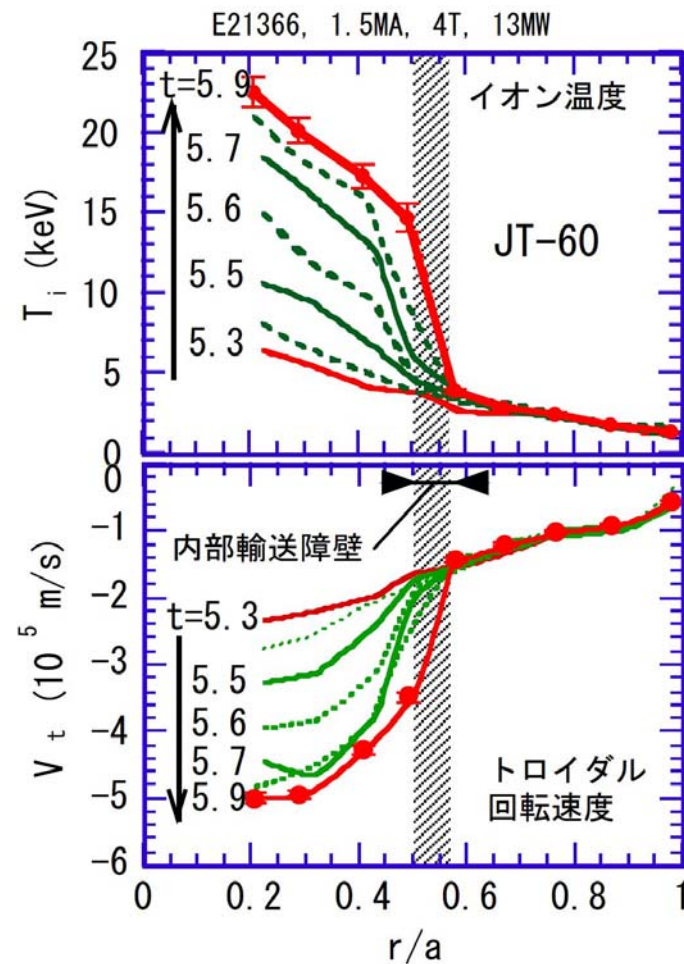
- 自由度が高く、散逸の弱い高温プラズマ
 - 乱流輸送に伴う構造形成や分岐現象，非線形ダイナミクスに伴う高速な状態遷移など，さまざまな非線形現象が観測されている。
- 核融合反応が持続的に維持されている燃焼プラズマ：高い自律性



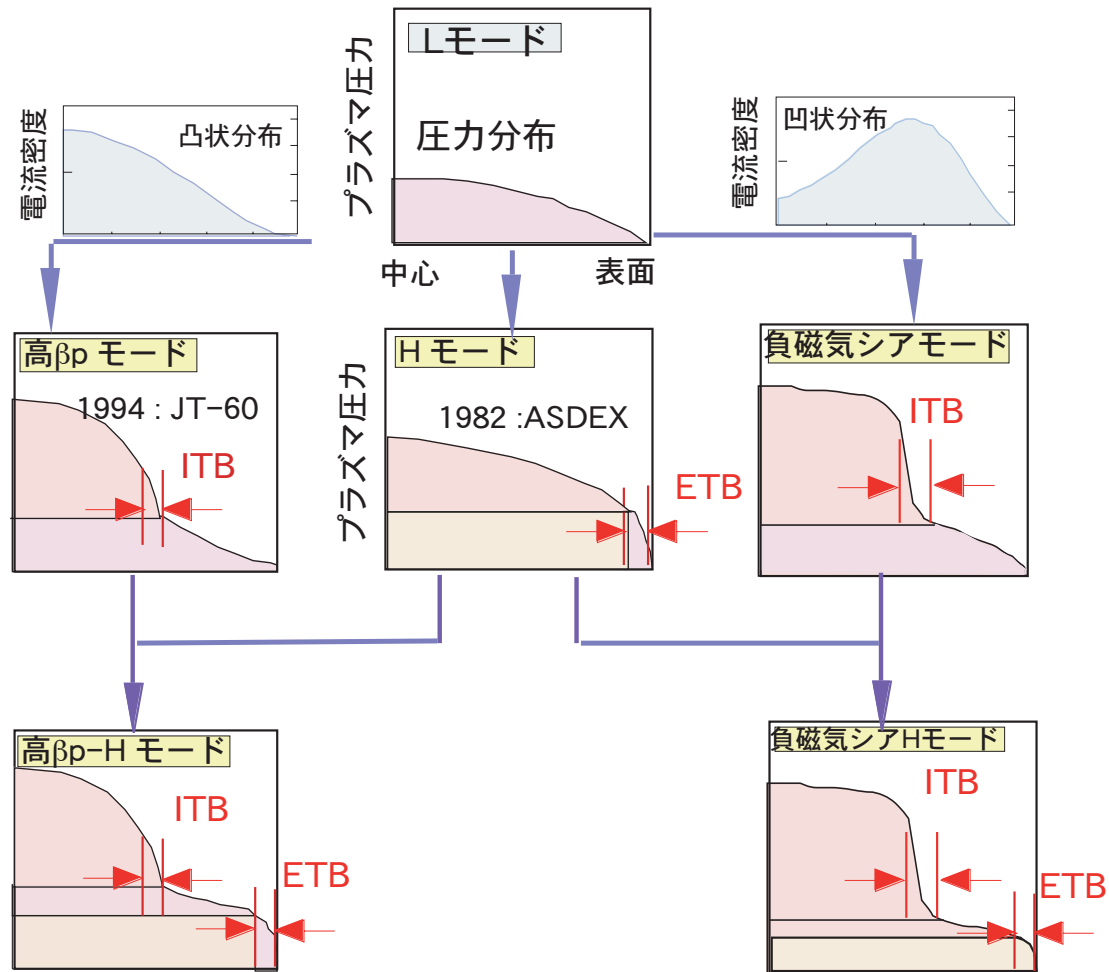
- より高いプラズマ性能を実現するために，非線形物理機構の体系的な理解と複合ダイナミクスの定量的予測が必要

閉じ込め改善モード

- H-mode : ASTEX (1982)
- Counter-NBI mode
- Core H-mode
- D_α H-mode
- Reversed (Negative) Shear mode
- Enhanced Reversed Shear mode
- High Density H-mode
- Helical Electron ITB
- High β_p mode
- High β_p -H mode
- High l_i -mode
- High T_i mode
- I-mode
- Improved Ohmic Confinement mode
- Lower-Hybrid Enhanced Performance mode
- Pellet Enhanced Performance mode
- Pellet Enhanced Performance H-mode
- Radiation Improved Mode
- Super shot
- VH-mode
- etc ...



閉じ込め改善モードと空間構造



輸送障壁

表面輸送障壁 (ETB)
内部輸送障壁 (ITB)

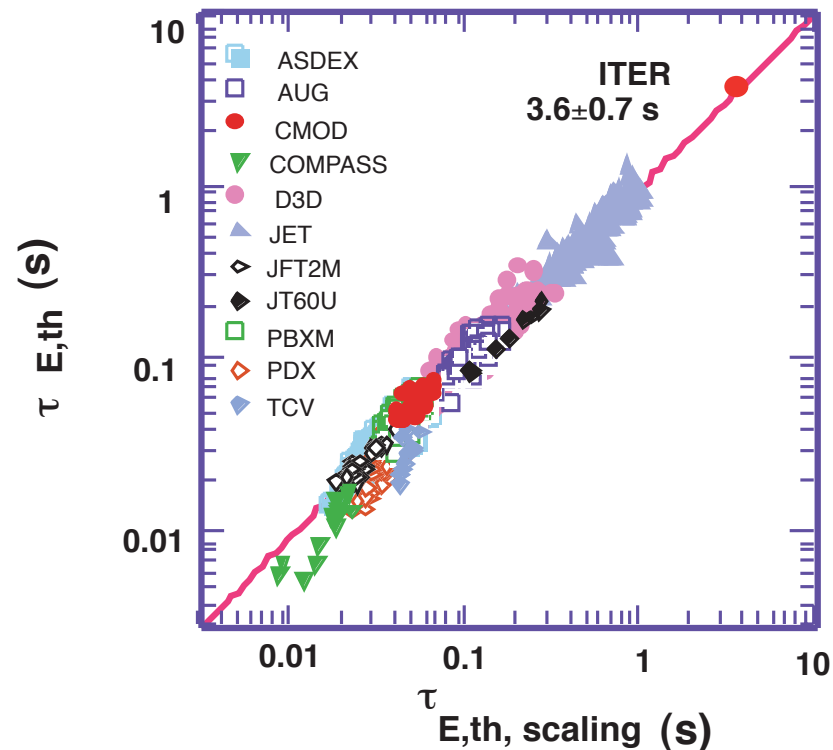
閉じ込め時間比例則

- **エネルギー閉じ込め時間**：巨視的な閉じ込め性能

$$\tau_E = \frac{3nTV}{P_{\text{heat}}} = \frac{\text{蓄積エネルギー}}{\text{加熱パワー}}$$

- **Hモード閉じ込め時間比例則**： κ : 楕円度, M : 平均質量数

$$\tau_{E,\text{th}}^{\text{IPB98}(y,2)} = 0.0562 M^{0.19} I_p^{0.93} B^{0.15} R^{1.39} a^{0.58} \kappa^{0.78} (n/10^{19})^{0.41} P^{-0.69}$$



輸送過程

- 衝突輸送

- 粒子軌道による分類

- 古典輸送 (均一磁場) サイクロトロン運動 + 衝突
- 新古典輸送 (不均一磁場) 旋回中心のドリフト運動 + 衝突

- 乱流輸送

- 圧力勾配や電流密度勾配によって励起される微視的揺動

- 電場揺動 ($E \times B$ 運動) $\left\{ \begin{array}{l} \text{静電モード} (E = -\nabla\phi) \\ \text{電磁モード} (E = -\nabla\phi - \partial A/\partial t) \end{array} \right.$
- 磁場揺動 (乱れた磁力線に沿う運動)

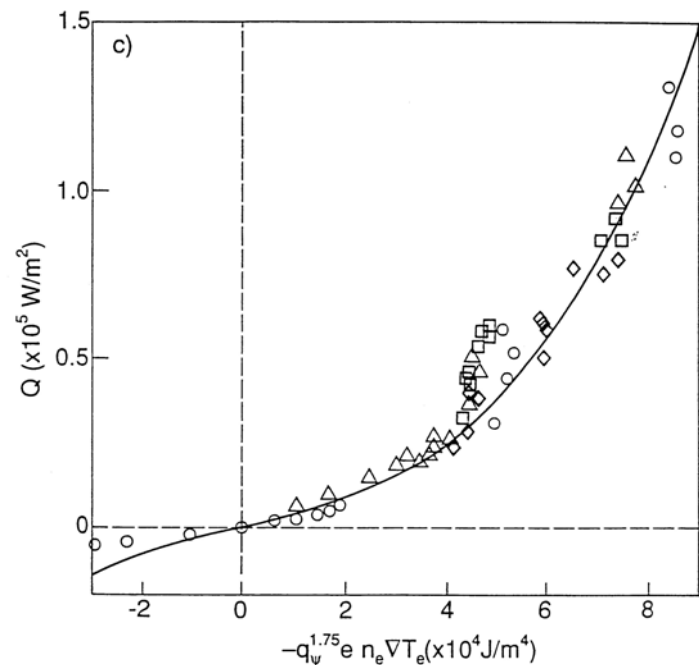
- 非線形減衰機構による揺動振幅の飽和

- 電磁場揺動による半径方向流れの誘起

非平衡開放系としての閉じ込めプラズマ

- 熱平衡状態に近い系：古典 / 新古典的衝突輸送
 - 線形応答理論：流束 勾配
- 熱平衡状態から離れた系：乱流輸送
 - 非線形応答：流束 $\propto (\text{勾配})^\alpha$ ($\alpha > 1$)
 - 流束 $\propto H(\text{勾配} - \text{臨界勾配})$ ：階段関数

熱流束の温度勾配依存性
(JET トカマク)



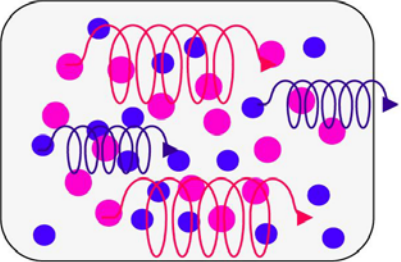
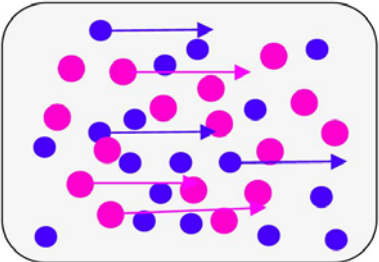
乱流輸送に寄与し得る微視的不安定

- イオンのサイクロトロン半径程度以下の波長をもつ不安定
- 代表的なモード
 - 静電的モード
 - 捕捉電子モード：電子ドリフト周波数
 - イオン温度勾配モード：イオンドリフト周波数
 - 電子温度勾配モード：電子ドリフト周波数
 - 電磁的モード
 - 高 n バルレーニングモード：周波数 ~ 0
- 配位
 - スラブ配位：圧力勾配駆動
 - トーラス配位：圧力勾配 + 磁場勾配駆動

乱流抑制の物理機構

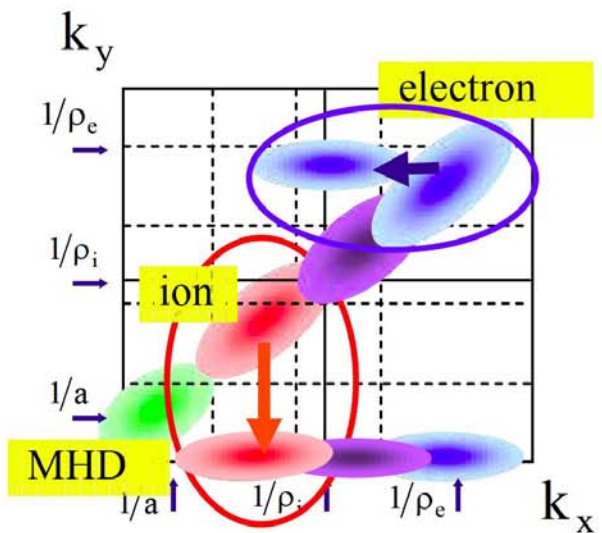
- **磁気シア**
 - 磁気シアが強くて弱くても安定化
- **磁気軸シフト**
 - 圧力勾配の増大に伴って磁気軸シフトが大きくなると、安定化
- **トロイダル回転速度シア**
 - トロイダル速度シアの増大はドリフト波の安定性を変化
- **ポロイダル回転速度シア（径方向電界駆動）**
 - $E \times B$ ドリフトによるポロイダル回転速度シアが安定化
- **ポロイダル回転速度シア（非線形駆動）**
 - 揺動電界の非線形相互作用により、帯状流を誘起し、安定化
- **乱流揺動伝搬**
 - 乱流揺動が空間的に伝搬し、安定領域で減衰

核融合プラズマシミュレーション手法

粒子軌道	速度分布	速度モーメント
<p data-bbox="257 403 701 467">完全粒子モデル</p> 	<p data-bbox="922 403 1303 467">運動論モデル</p> $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$	<p data-bbox="1467 403 2036 467">ランダウ流体モデル</p>
<p data-bbox="197 818 761 882">ジャイロ粒子モデル</p> 	<p data-bbox="801 818 1429 882">ジャイロ運動論モデル</p> $f(\mathbf{R}, E, \mu, t)$	<p data-bbox="1467 818 2036 882">ジャイロ流体モデル</p>
		<p data-bbox="1556 1233 1937 1297">多流体モデル</p>
		<p data-bbox="1527 1321 1966 1385">電磁流体モデル</p>

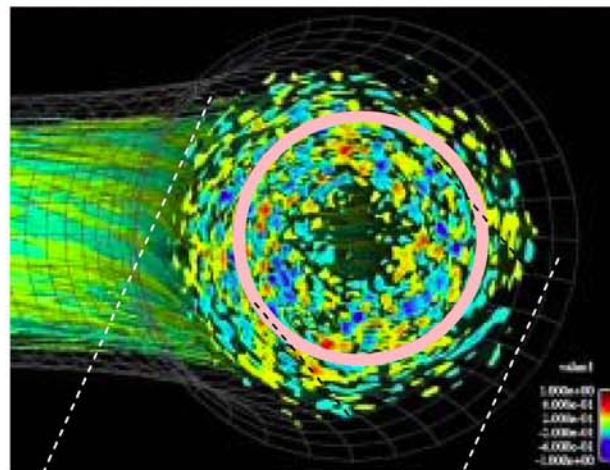
大域的乱流シミュレーション

層流生成を含めたイオン系輸送の評価 (実装置サイズ)

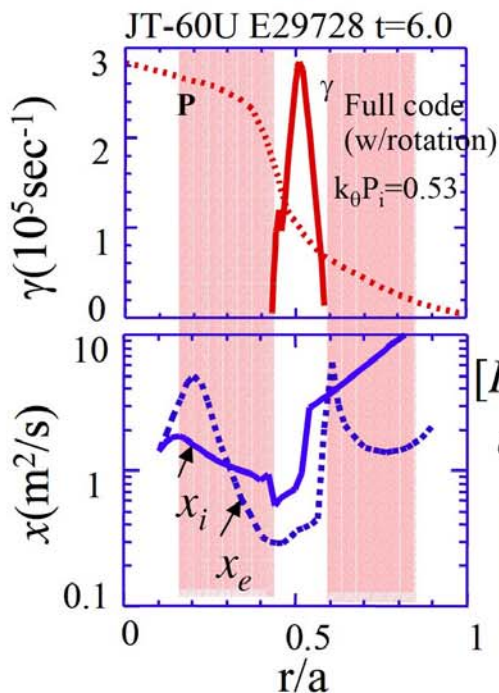


イオン系 ジャイロ粒子シミュレーション

[Idomura, et al., NF, '02]

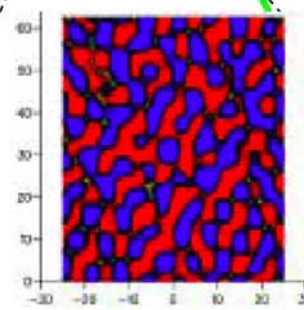
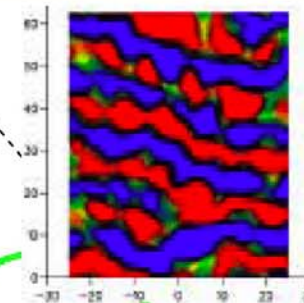
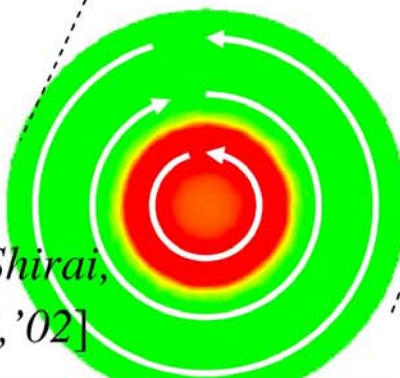


- ストリーマの出現 (←ラース外側) による異常電子輸送



[Rewoldt-Shirai, et al., NF, '02]

- 乱流の相関長と帯状流生成
- イオン輸送レベルの再現



電子系ジャイロ流体シミュレーション

[Li-Kishimoto, PRL, '02]

帯状流による乱流抑制

ITG乱流の大域シミュレーション : Z. Lin et al., Science (1998)

揺動ポテンシャルのポロイダル分布

$E \times B$ 流れあり

$E \times B$ 流れなし

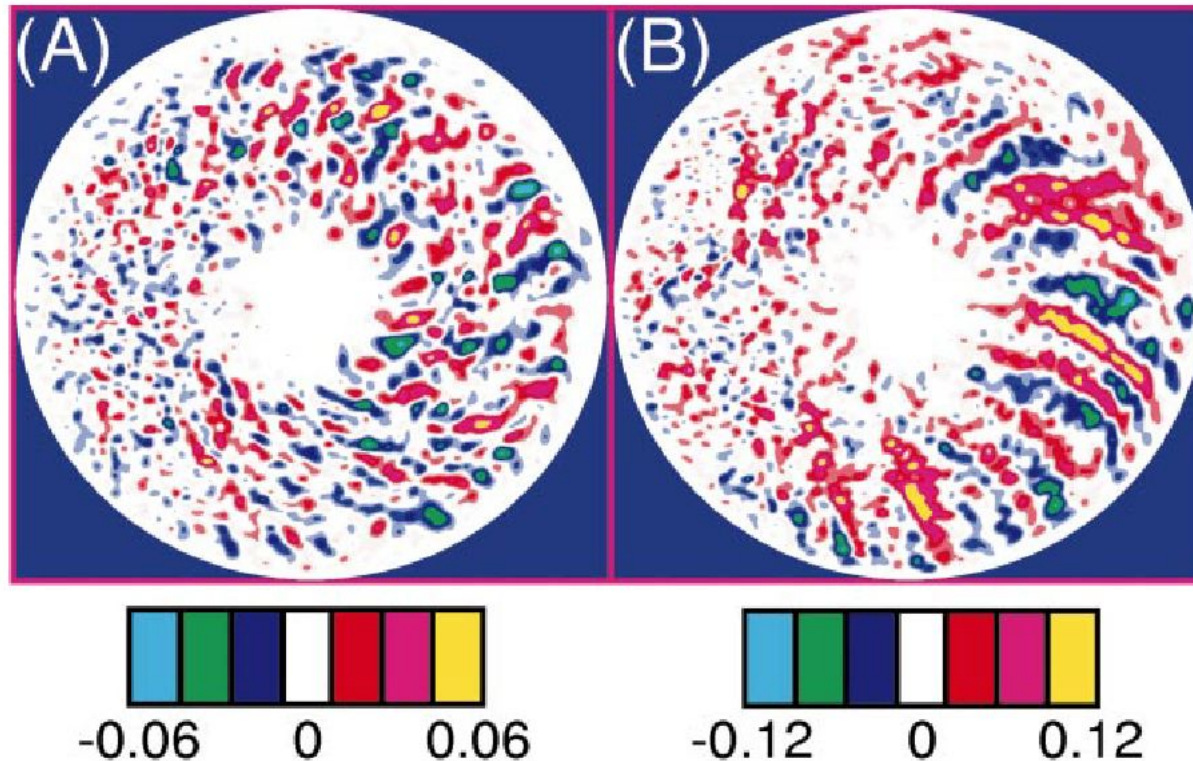
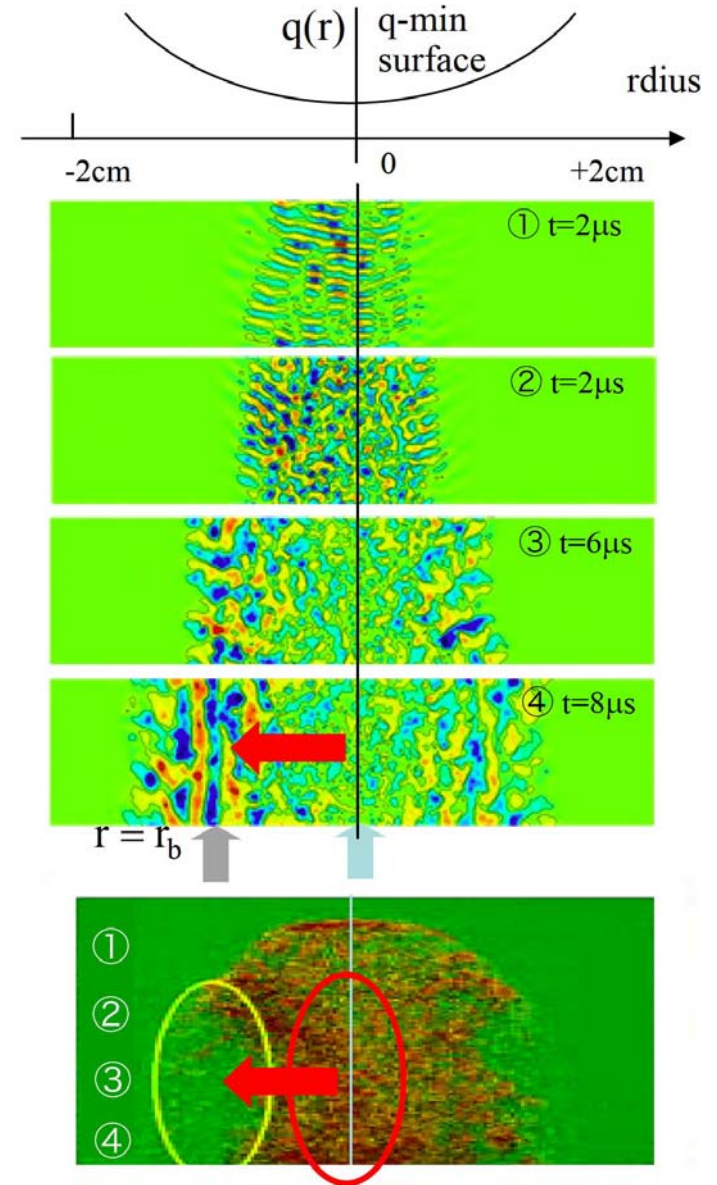
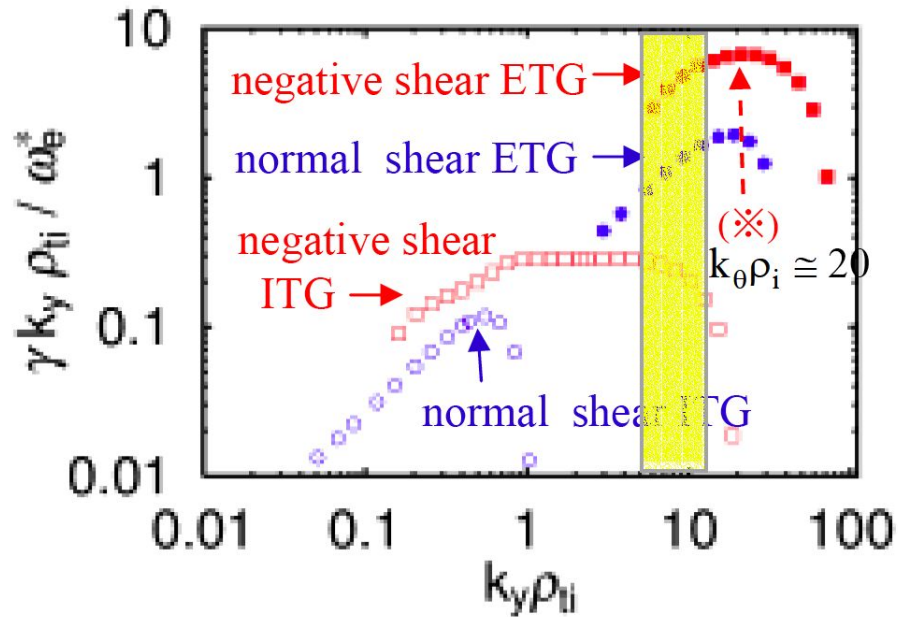


Fig. 2. Poloidal contour plots of fluctuation potential ($e\Phi/T_i$) in the steady state of nonlinear global simulation with $E \times B$ flows included (A) and with the flows suppressed (B). The dominant poloidal spectrum $k_\theta = 0$ mode is filtered out to highlight the differences in the turbulent eddy size.

相関距離 短く, 振幅 小

相関距離 長く, 振幅 大

帯状流による電子温度勾配モードの安定化



- **Gyro-particle simulation:**
Idomura, et al., IAEA (2002), NF(2002)
- $q = q_{min}$ 面近傍で強い乱流が励起
- 非線形駆動された帯状流が $q = q_{min}$ 面より内側で乱流を抑制

乱流熱拡散係数のシステム長依存性

イオン温度勾配モード乱流シミュレーション

Z. Lin et al., PRL (2002)

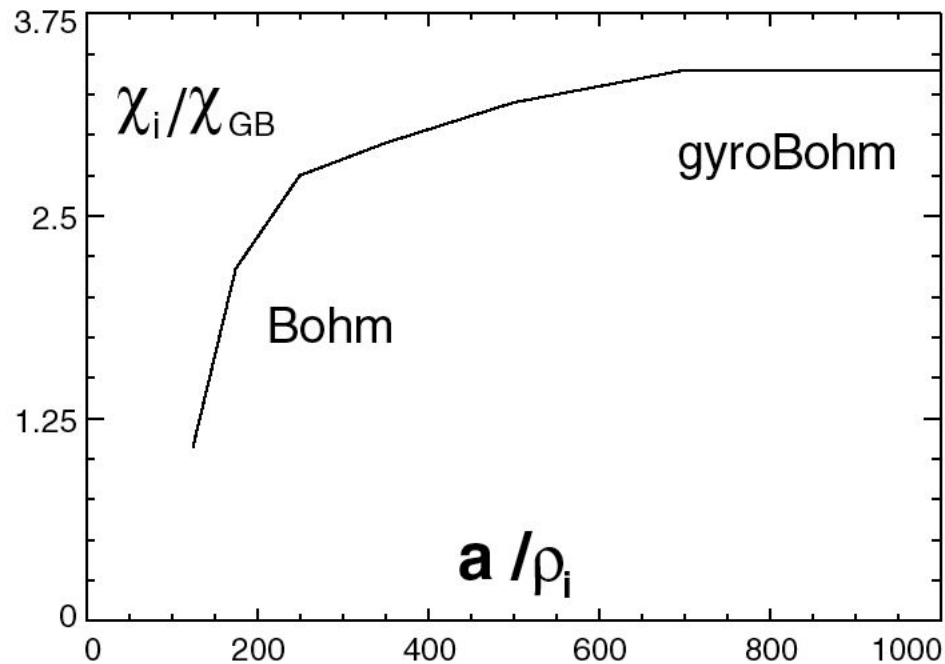


FIG. 3. Ion heat conductivity vs tokamak minor radius.

ボーム則

$$\chi_B \propto \rho v_T = \frac{T}{eB}$$

ジャイロボーム則

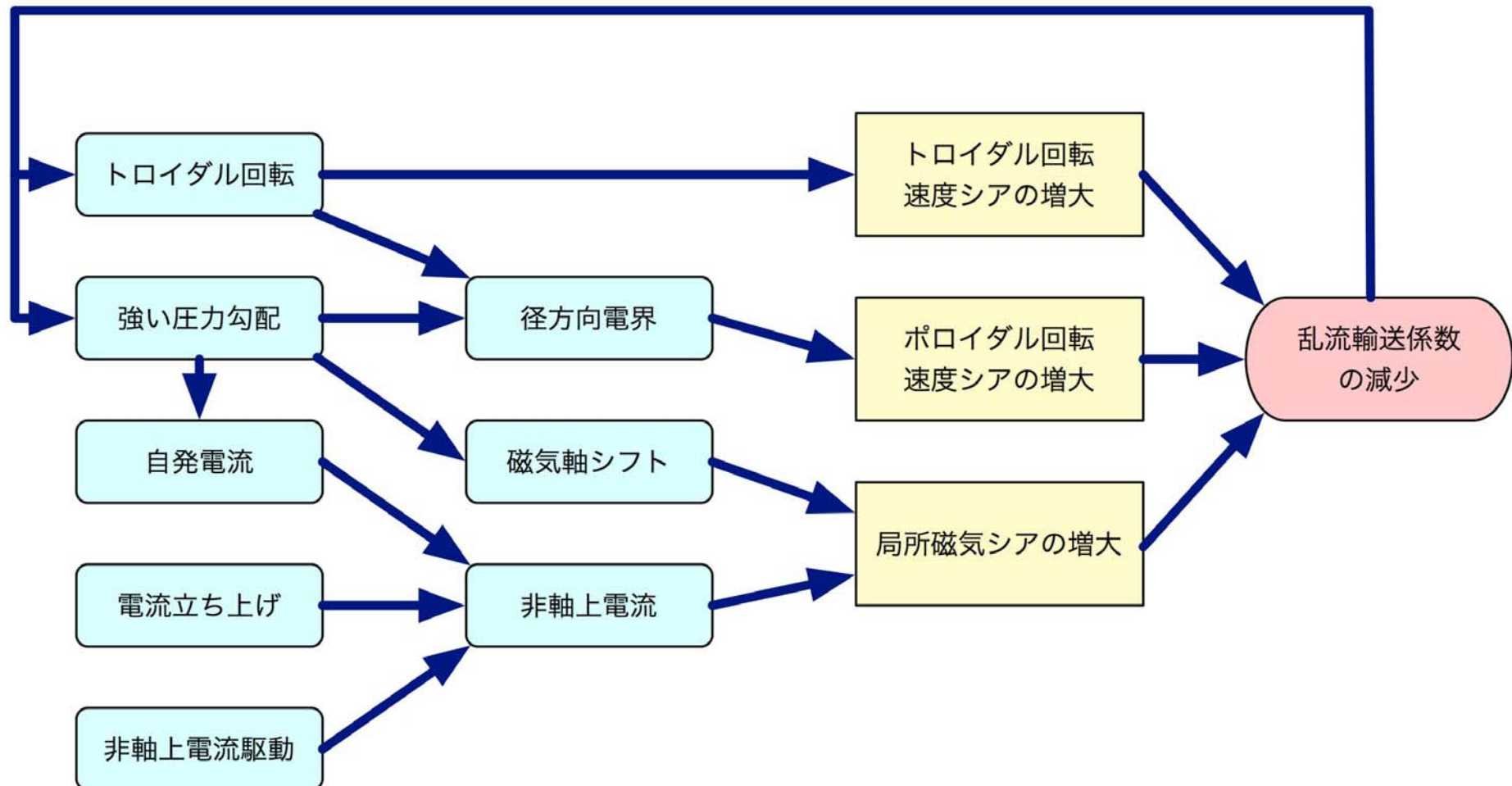
$$\chi_{GB} \propto \frac{\rho}{L} \chi_B$$

システム長が短いと，乱流揺動伝搬により振幅減少

システム長が長いと，ジャイロボーム則に漸近

輸送障壁形成の物理機構

- 輸送障壁の形成が乱流輸送をさらに抑制する正帰還ループの存在：
⇒ 構造形成，自己組織化

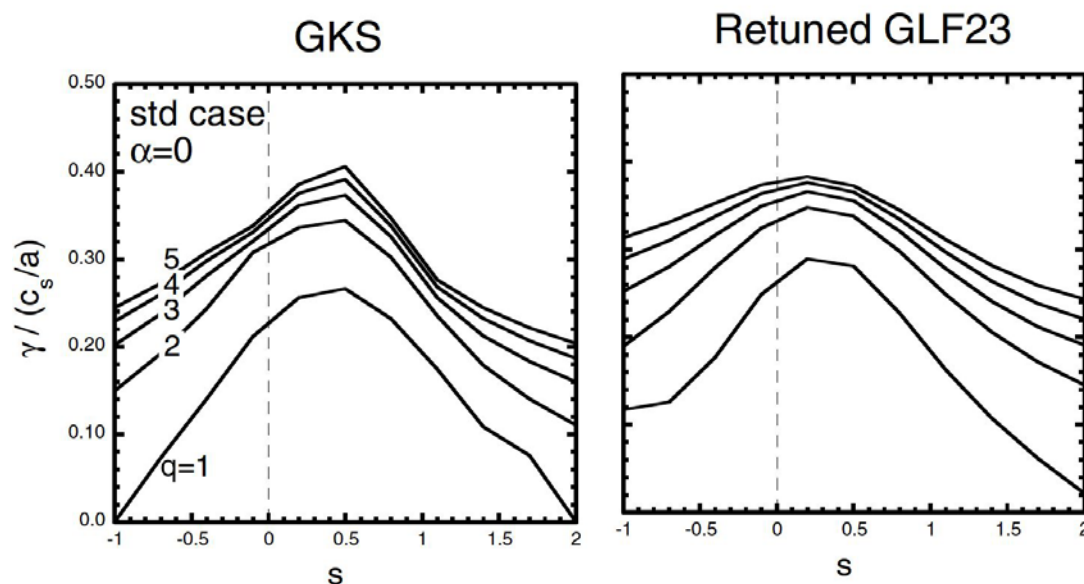


イオン温度勾配モード乱流モデル (I)

- **GLF23 輸送モデル** : GA グループ (Waltz, Kinsey) 開発
 - 20 モードのジャイロ流体的線形安定性解析
 - 線形成長率から拡散係数評価 (準線形 Mixing Length Rule)

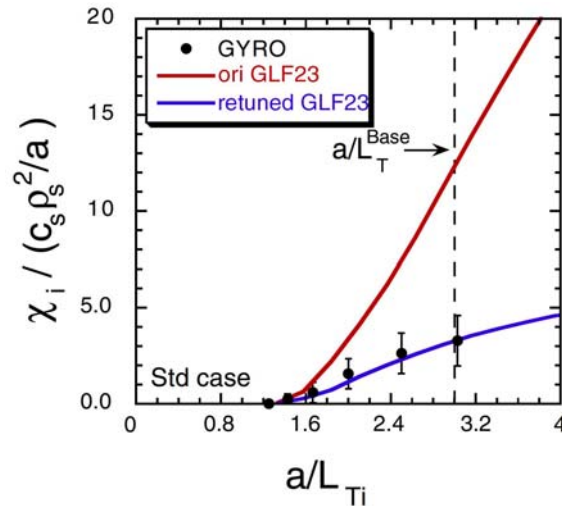
$$\chi \propto \frac{\gamma - \gamma_E}{k^2} \frac{\gamma_d \gamma}{\omega^2 + \gamma^2}, \quad \gamma_E : E \times B \text{ shear rate}, \quad \gamma_d : \text{帯状流減衰率}$$

- **理論** : ジャイロ運動論的線形安定性解析 : **GKS**
 - いろいろな配位において線形安定性を比較し, 係数を較正

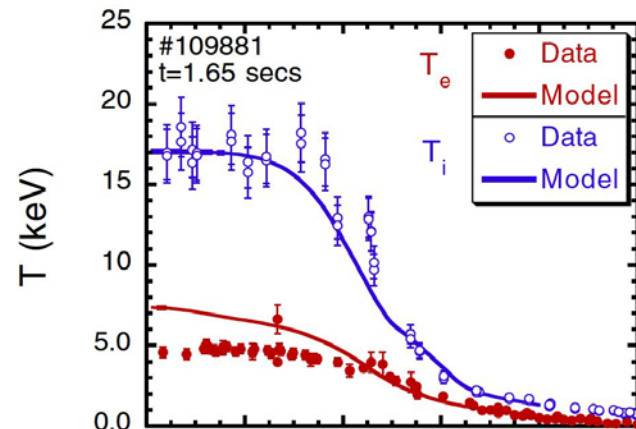


イオン温度勾配モード乱流モデル (II)

- シミュレーション: ジャイロ運動論的非線形シミュレーション: **GYRO**
 - 線形成長率と拡散係数との関係を較正



- 実験をかなりよく再現



電流拡散性バルーニングモード乱流輸送モデル

- 非線形安定限界条件から求められた熱拡散係数

$$\chi_{\text{TB}} = F(s, \alpha, \kappa, \omega_{E1}) \alpha^{3/2} \frac{c^2}{\omega_{pe}^2} \frac{v_A}{qR}$$

磁気シア

$$s \equiv \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$$

圧力勾配

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

磁気曲率

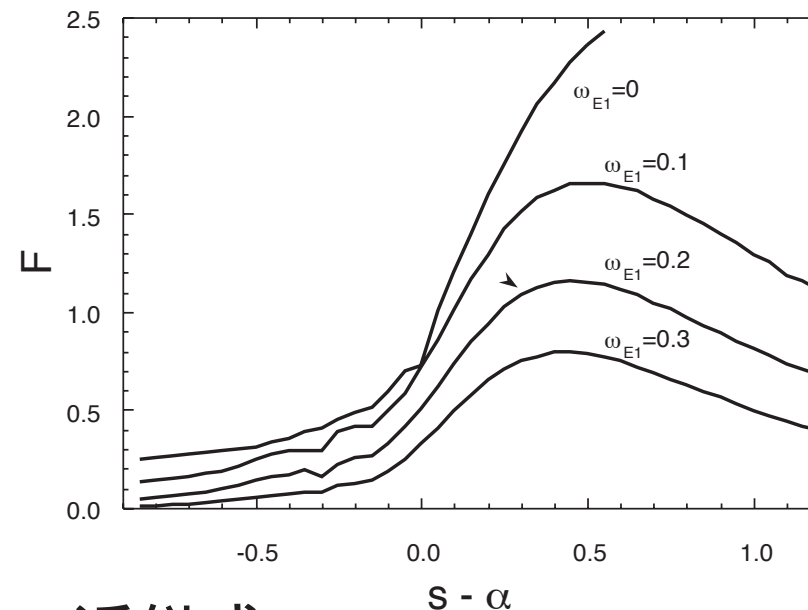
$$\kappa \equiv -\frac{r}{R} \left(1 - \frac{1}{q^2}\right)$$

$E \times B$ 回転シア

$$\omega_{E1} \equiv \frac{qR}{sv_A B_\theta} \frac{dE}{dr}$$

- 負磁気シア, 磁気軸シフト, $E \times B$ 回転シアは輸送を減少させる.

- 因子 F の $s - \alpha$ 依存性



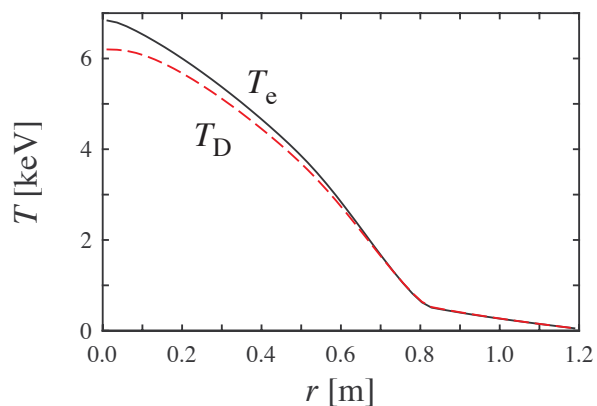
- 近似式

$$F_{\text{BM}} = \begin{cases} \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2}(1 - 2s')(1 - 2s' + 3s'^2)} & \text{for } s' = s - \alpha < 0 \\ \frac{1}{1 + 9\sqrt{2}s'^{5/2}} & \\ \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2}(1 - 2s' + 3s'^2 + 2s'^3)} & \text{for } s' = s - \alpha > 0 \end{cases}$$

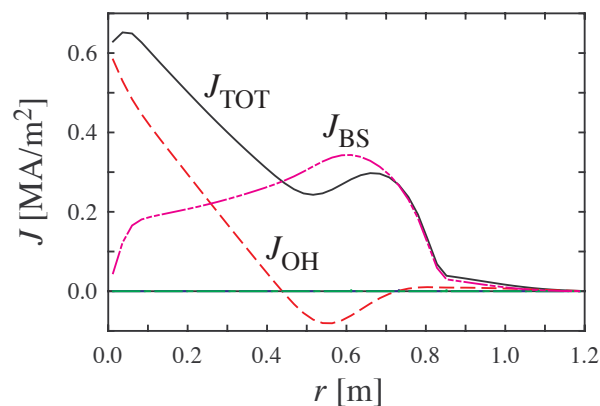
高 β_p モード (I)

- $R = 3\text{ m}$, $a = 1.2\text{ m}$, $\kappa = 1.5$, $B_0 = 3\text{ T}$, $I_p = 1\text{ MA}$
- $P_H = 20\text{ MW}$ の加熱開始 1 秒後

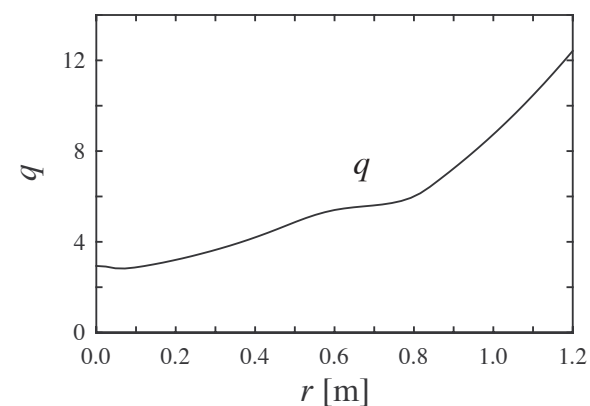
温度分布



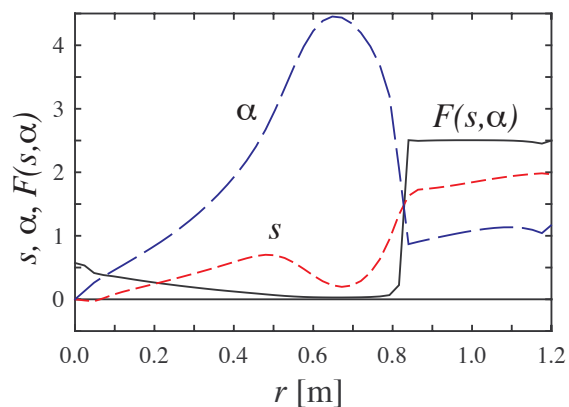
電流分布



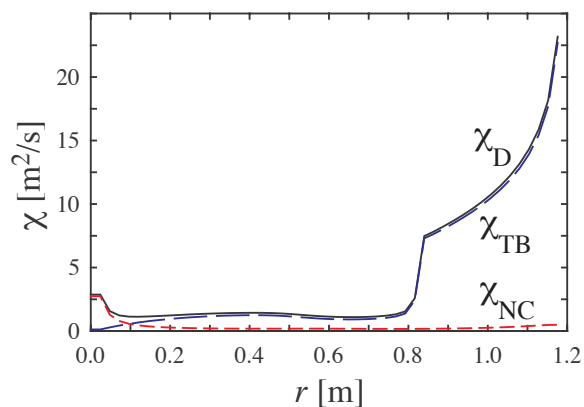
安全係数分布



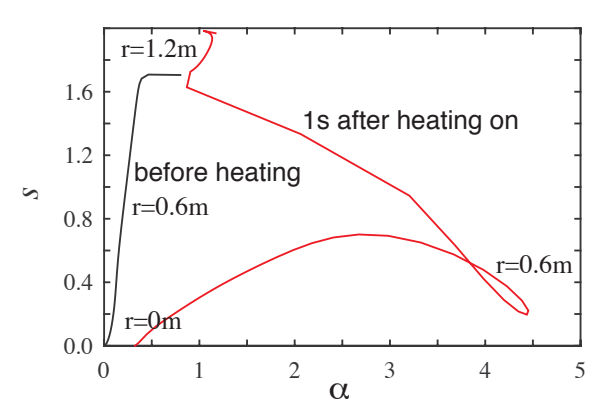
磁気シア・圧力勾配



熱拡散係数

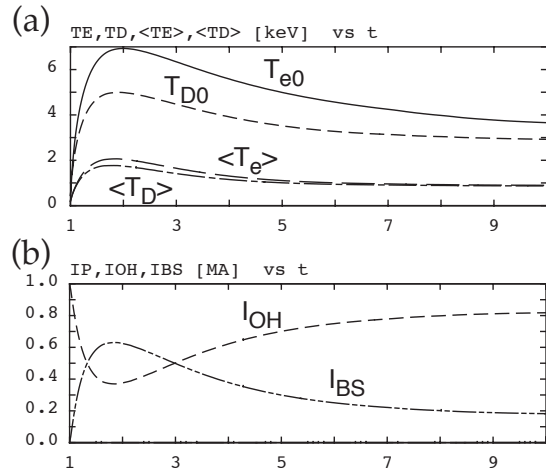


s - alpha 軌跡

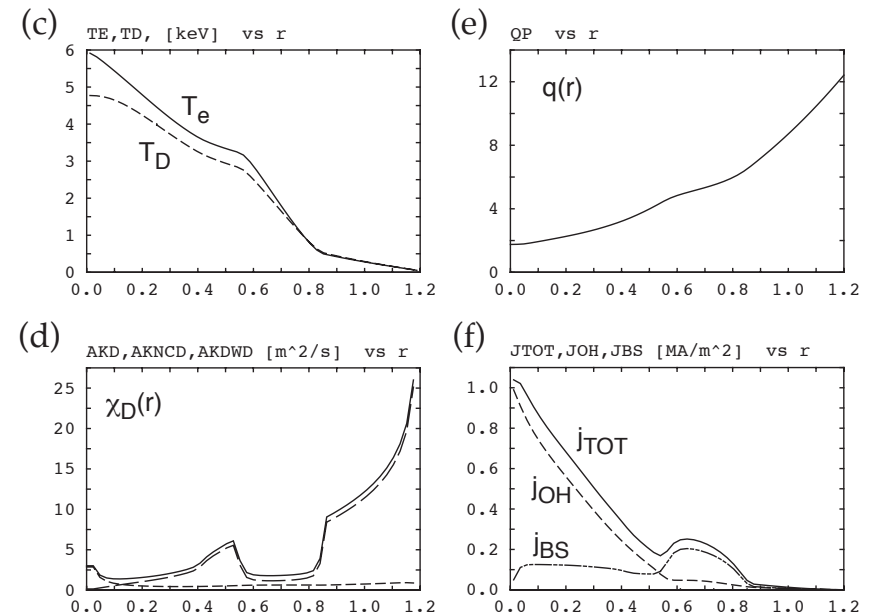
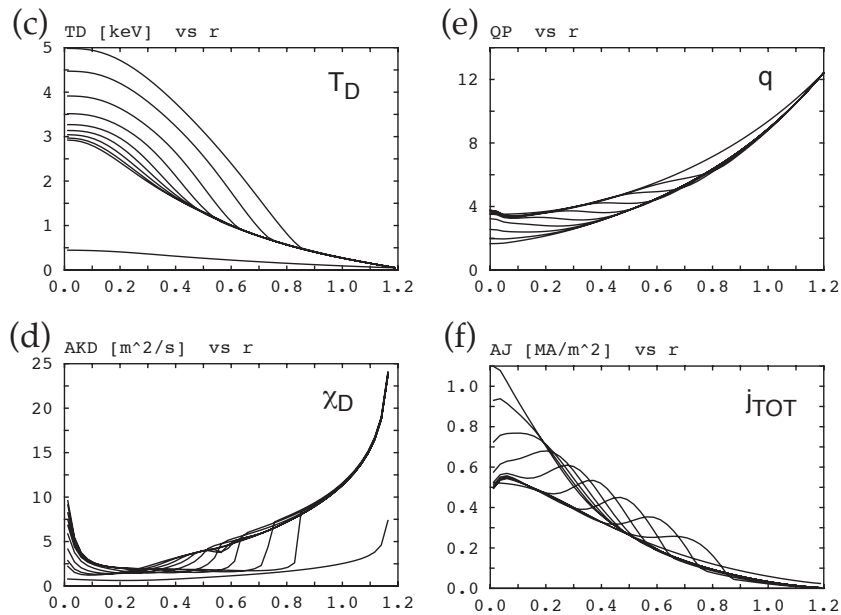
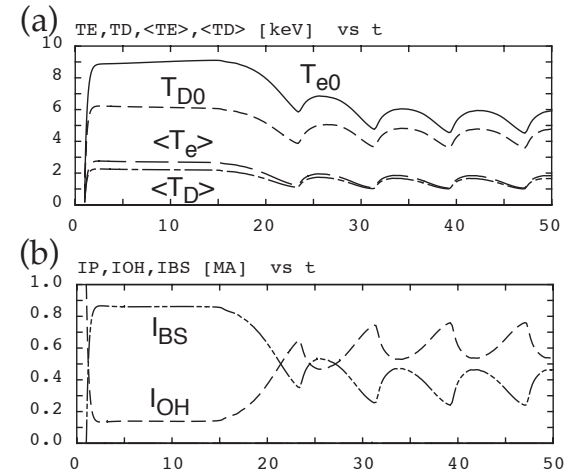


高 β_p モード (II)

● $P_H = 20 \text{ MW}$



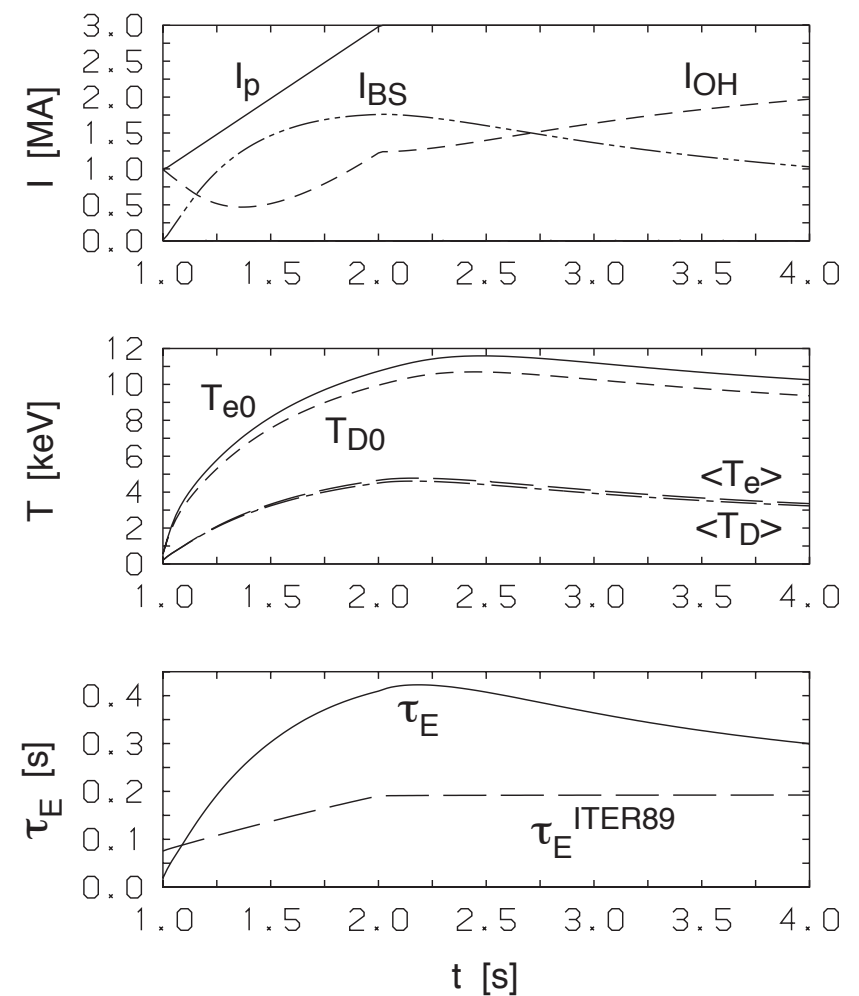
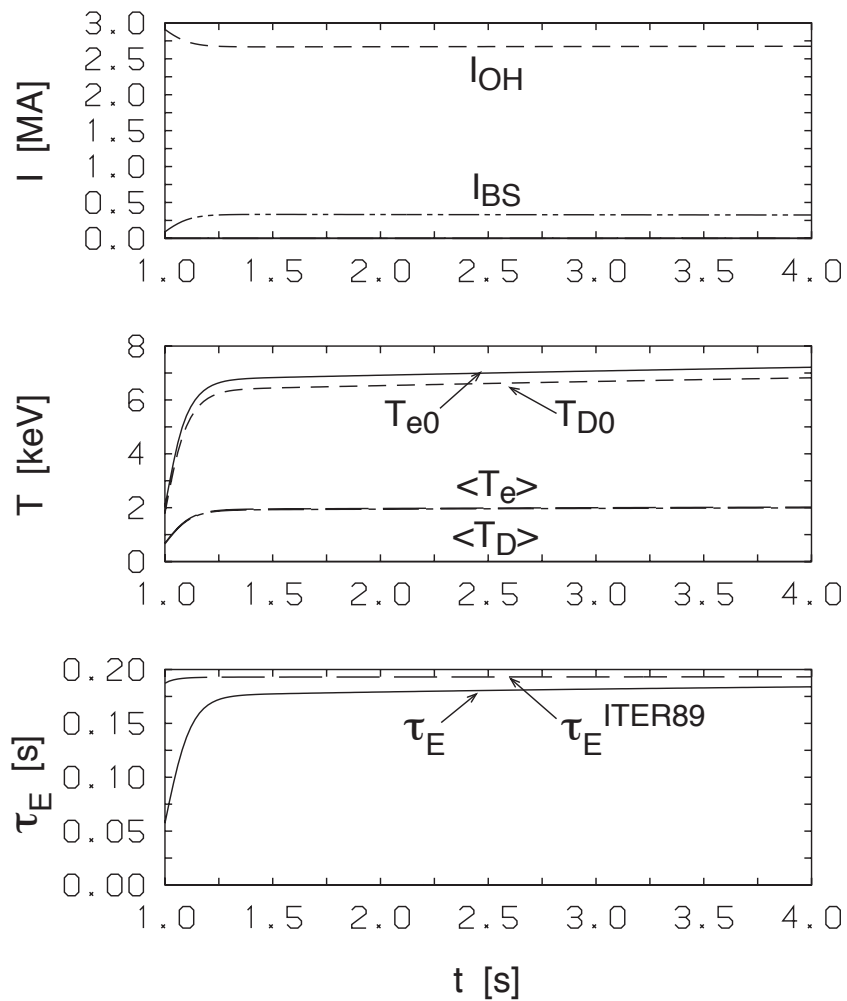
● $P_H = 24.2 \text{ MW}$



負磁気シア配位における輸送シミュレーション

I_p : 3 MA 一定
 加熱パワー : 20 MW
 H factor \simeq 0.95

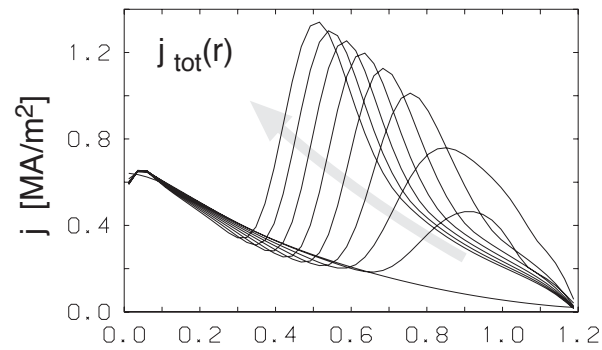
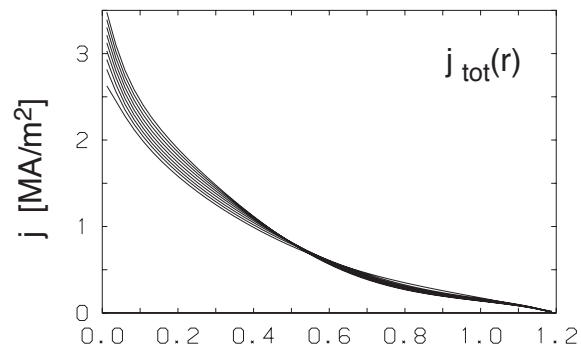
I_p : 1 MA \rightarrow 3 MA/1 s
 加熱パワー : 20 MW
 H factor \simeq 1.6



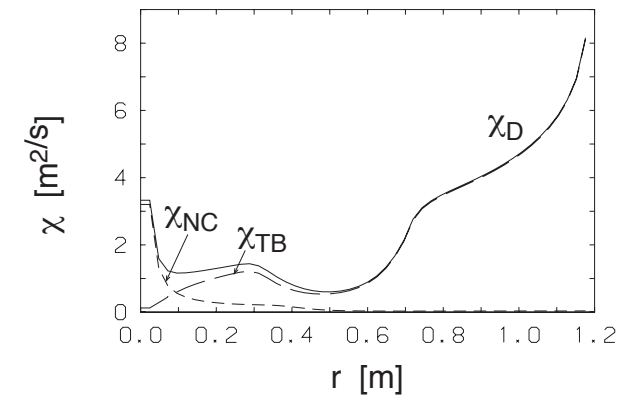
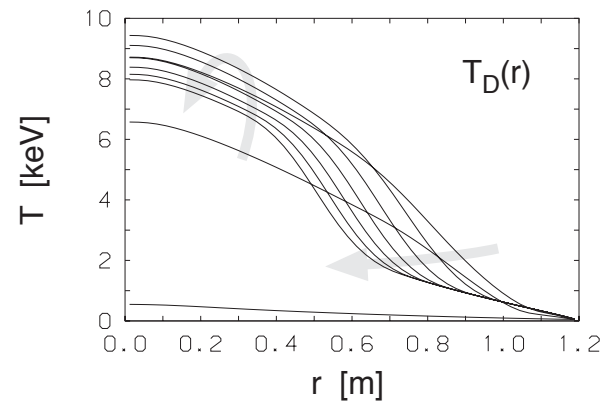
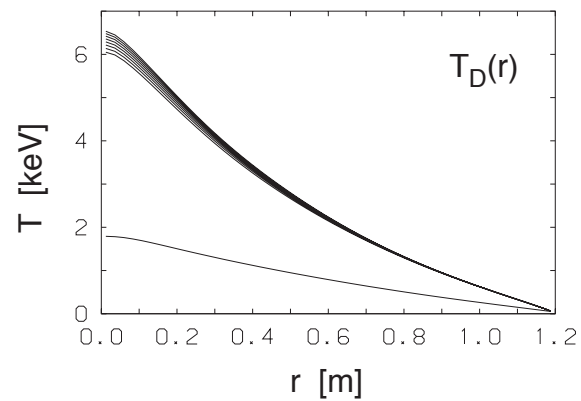
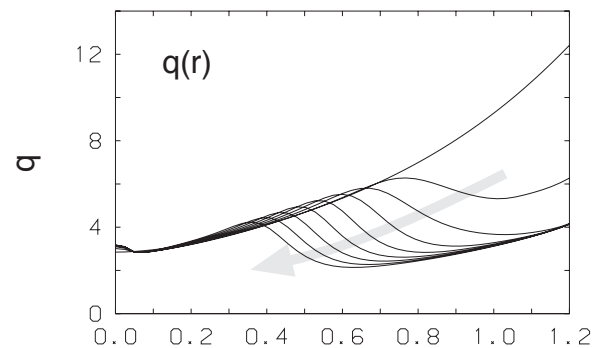
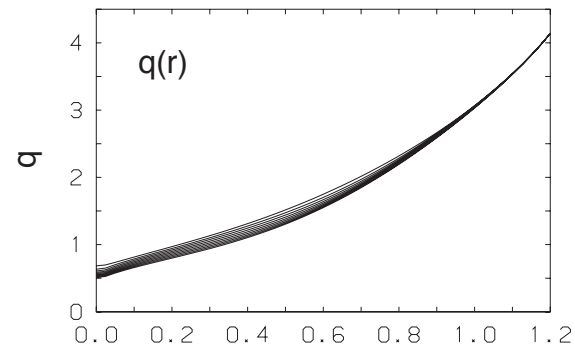
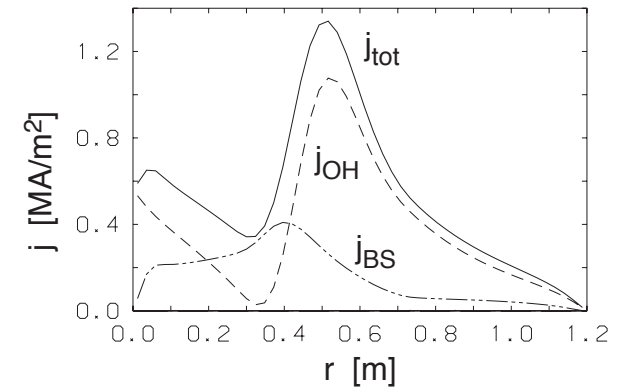
負磁気シア配位の時間発展

$I_p : 3 \text{ MA}$ 一定

$I_p : 1 \text{ MA} \longrightarrow 3 \text{ MA}/1 \text{ s}$



$t = 5 \text{ s}$

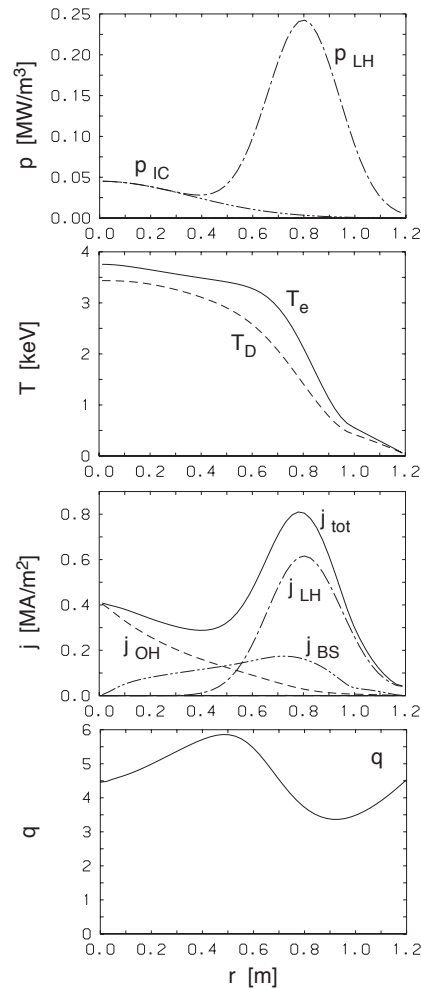


負磁気シア配位の維持

非軸上電流駆動

$$(H \simeq 1.2)$$

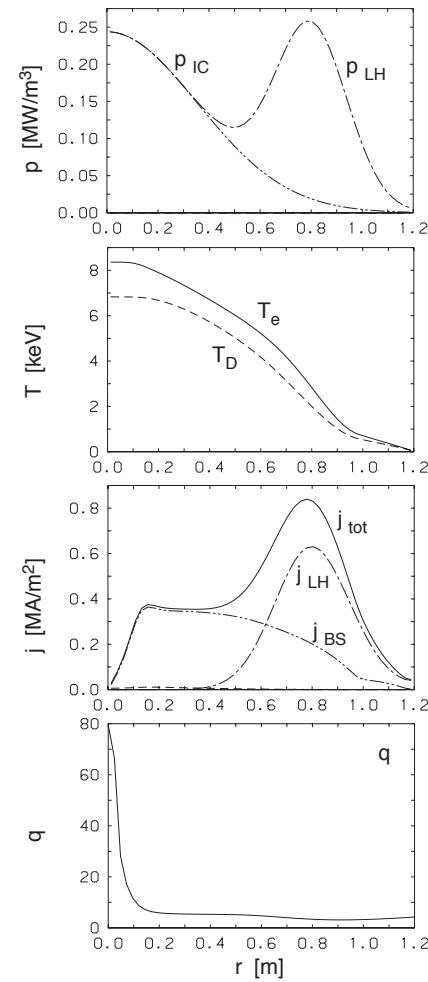
$$P_{LH}/P_{IC} = 12/2 \text{ MW}$$



完全電流駆動

$$(H \simeq 1.6)$$

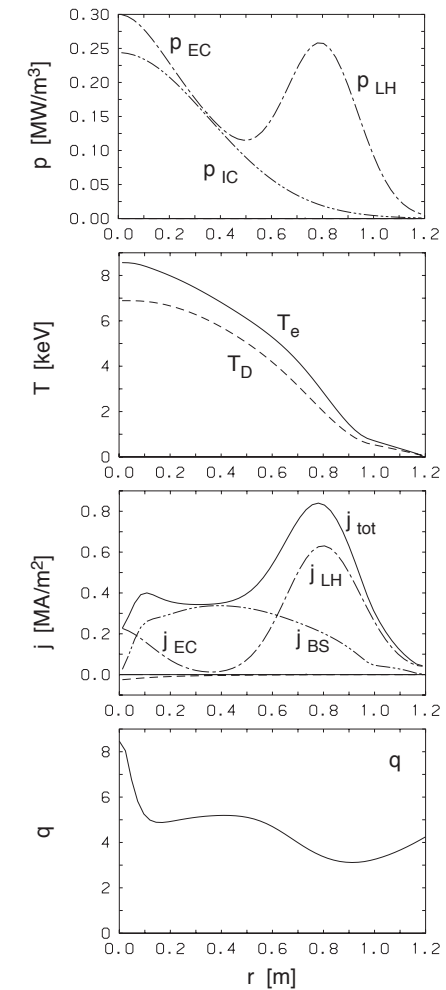
$$P_{LH}/P_{IC} = 12/10.8 \text{ MW}$$



完全電流駆動 + 軸上電流駆動

$$P_{LH}/P_{IC}/P_{EC}$$

$$= 12/10.8/0.2 \text{ MW}$$

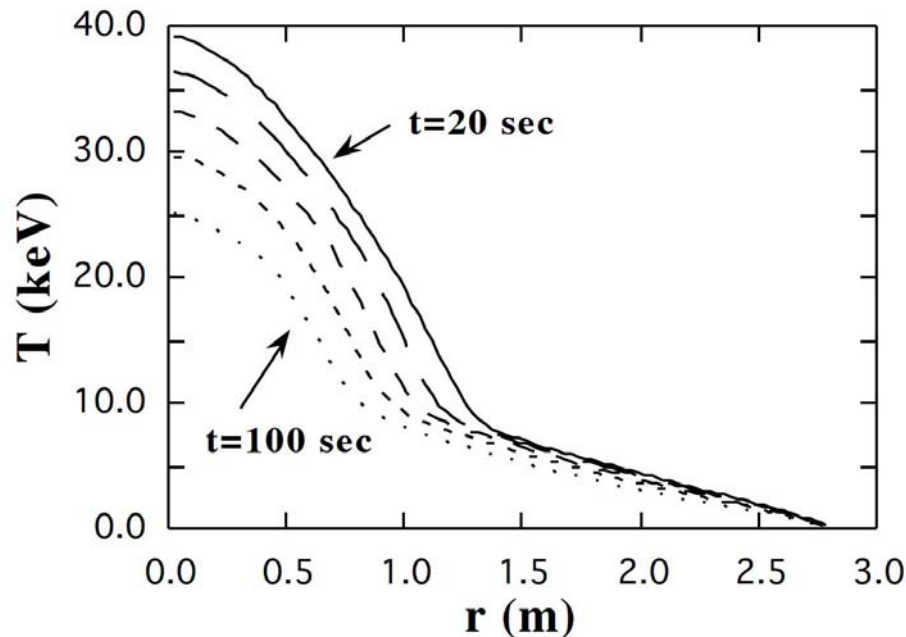


燃焼プラズマの輸送シミュレーション (I)

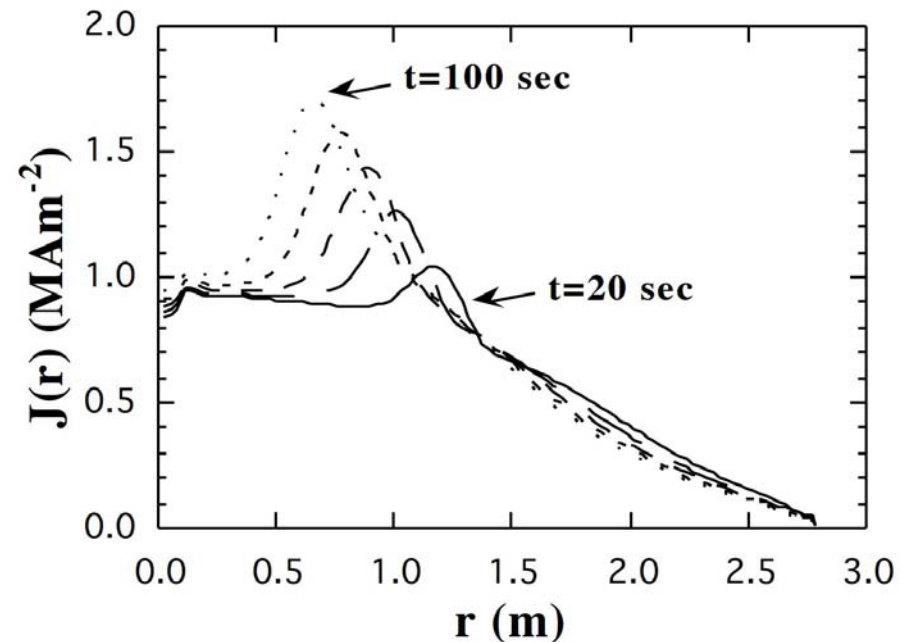
- G. Tateishi, et al. , Annual JPS meeting (1999)
- 発展方程式：熱輸送，ヘリウム輸送，ポロイダル磁場輸送
- 輸送モデル：新古典輸送 + CDBM乱流輸送モデル

電流分布制御なしに 100 s 程度の運転持続可能

温度分布の時間発展



電流分布の時間発展

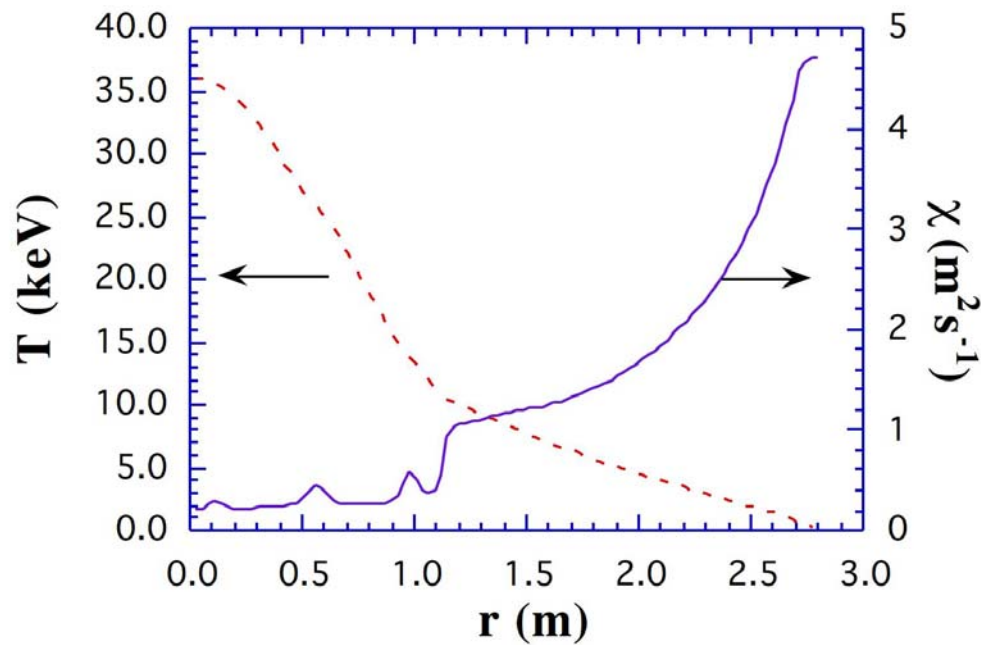


燃焼プラズマの輸送シミュレーション (II)

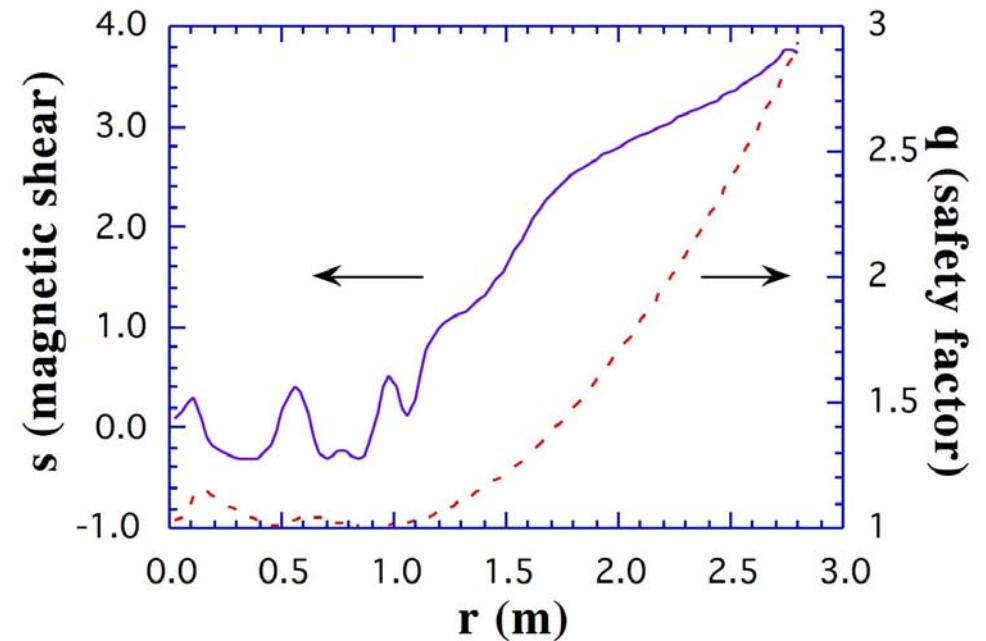
- 電流密度の中心集中に伴い，鋸歯状振動発生
- $q = 1$ 面が大きくなると，鋸歯状振動後の復帰不可能

磁気軸における逆方向電流駆動により，1000 s の運転持続可能

温度・熱拡散係数分布



磁気シア・安全係数分布



まとめ

- 高温プラズマの乱流輸送に関するさまざまな非線形現象の理論解析と大規模数値シミュレーションが進みつつあり，実験データとの比較によって定量的な理解が深まりつつある．
- プラズマ中の輸送障壁形成は，空間分布と乱流輸送係数の間の正帰還ループによって生み出される自己組織化現象であり，その研究は乱流輸送現象の解明に本質的な役割を果たしている．
- ITER 燃焼プラズマは，アルファ粒子加熱と自発電流により自律性の非常に高いプラズマであり，その予測と制御に向けて統合的なシミュレーションコードの開発が進められているが，先進的な運転モードを実現するためには輸送機構の理解がさらに必要である．

熱輸送シミュレーション

- 磁気面平均：小半径方向の1次元解析

- 不純物，中性粒子，鋸歯状振動の影響は取り入れていない。

- 密度分布固定： $n_e(r) \propto (1 - r^2/a^2)^{1/2}$

- 熱拡散係数 (実験結果と合わせるパラメータ $C = 12$)

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

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

- 輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} n_e T_e = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r n_e \chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r} + P_{OH} + P_{ie} + P_{He}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} n_i T_i = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r n_i \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial r} - P_{ie} + P_{Hi}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} B_\theta = \frac{\partial}{\partial r} \eta_{NC} \left[\frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r B_\theta - J_{BS} - J_{LH} \right]$$

L-mode 輸送と内部輸送障壁形成

- **0次元解析** : $F(s, \alpha, \kappa)$ 固定 (gyro-Bohm scaling)

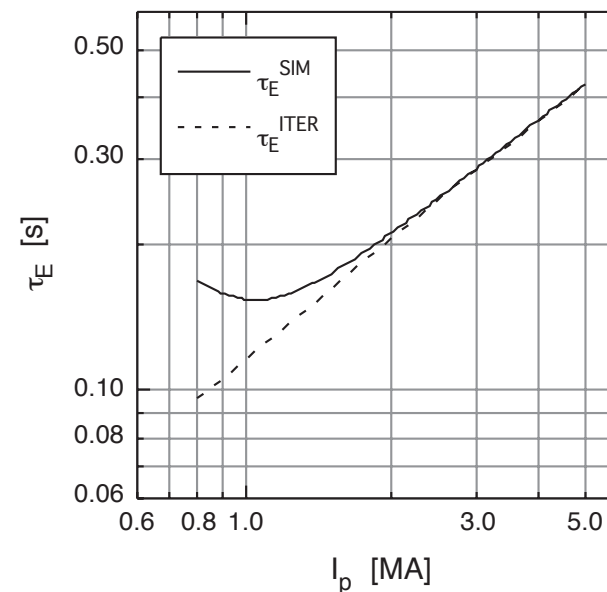
$$\tau_E \propto F^{-0.4} A_i^{0.2} I_P^{0.8} n^{0.6} B^0 a^{1.0} R_0^{1.2} P^{-0.6}$$

- **低 I_p 領域における L-mode 比例則からのずれ**

- P_{in} の増加
- 圧力勾配の増加
→ α の増加
- ブートストラップ電流の増加
→ s の減少
- Reduction of χ

- **さまざまな内部輸送障壁形成**

- **高 β_p モード**

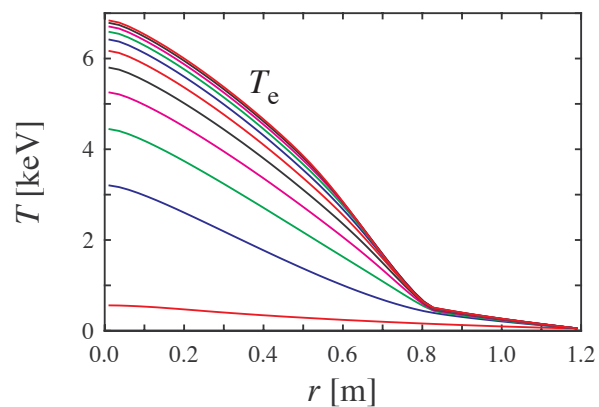


- **PEP** (Pellet Enhanced Performance) モード
- **LHEP** (Lower Hybrid Enhanced Performance) モード
- **負磁気シア** モード

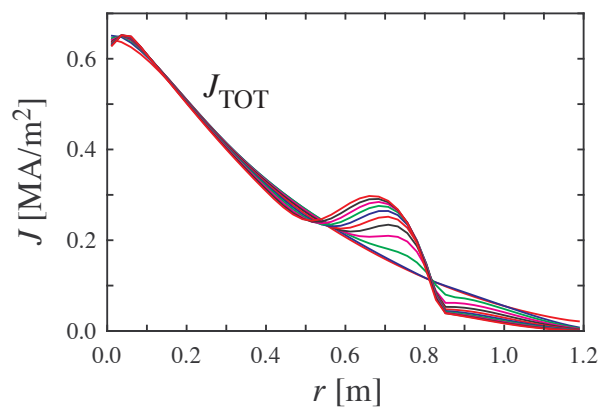
高 β_p モード (2)

- 加熱開始後，1秒間の時間発展

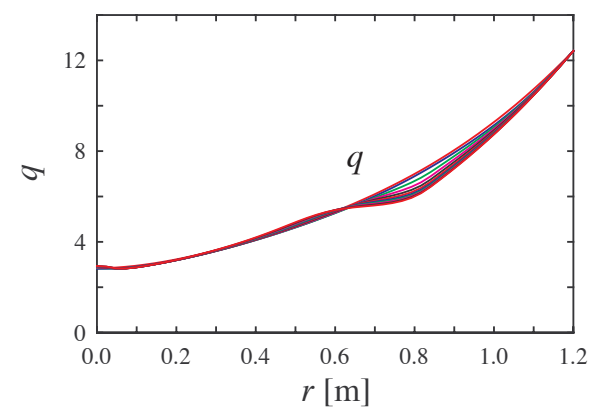
温度分布



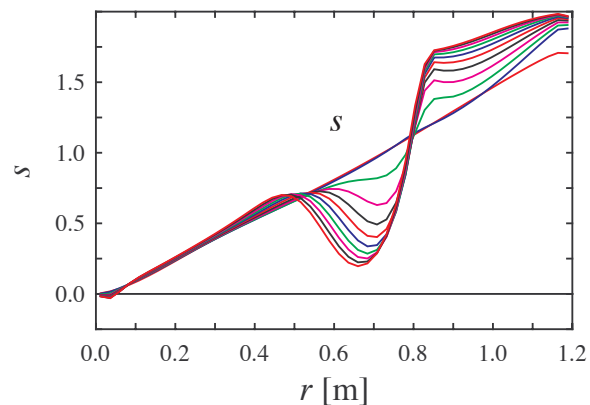
電流分布



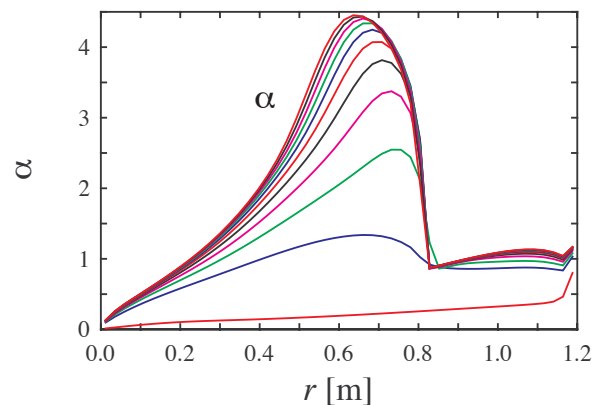
安全係数分布



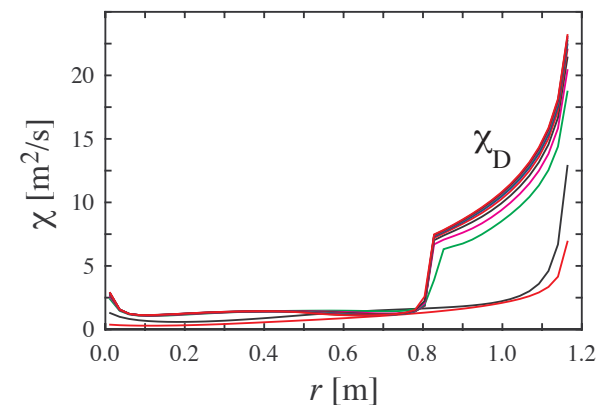
磁気シア



規格化圧力勾配



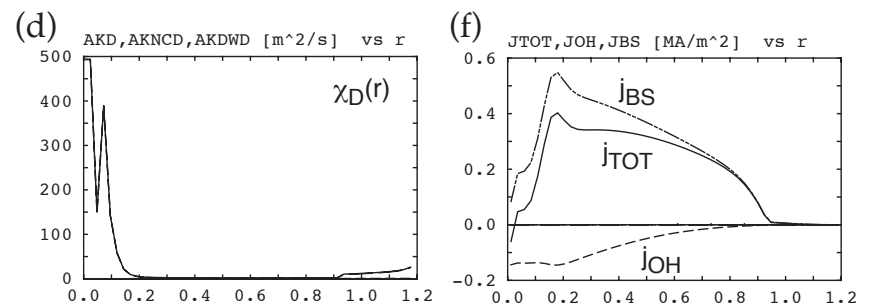
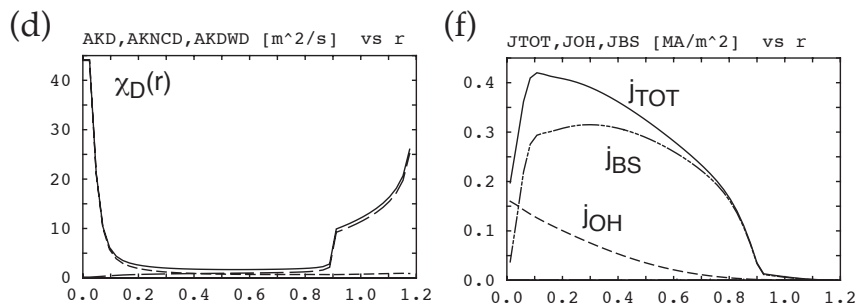
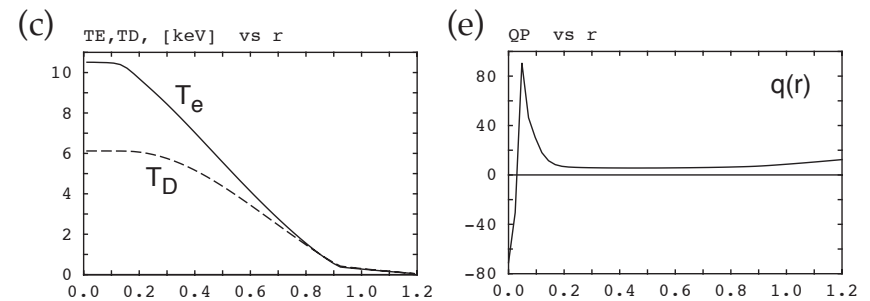
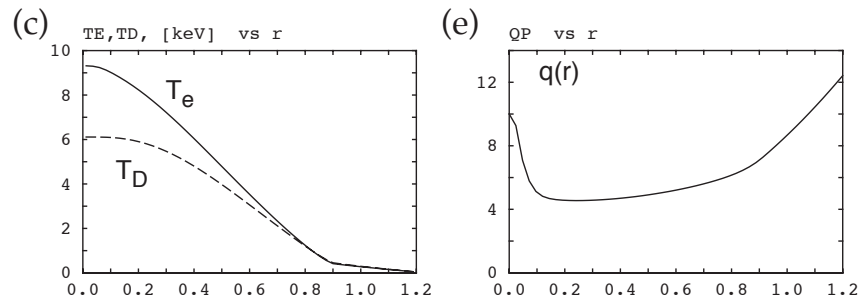
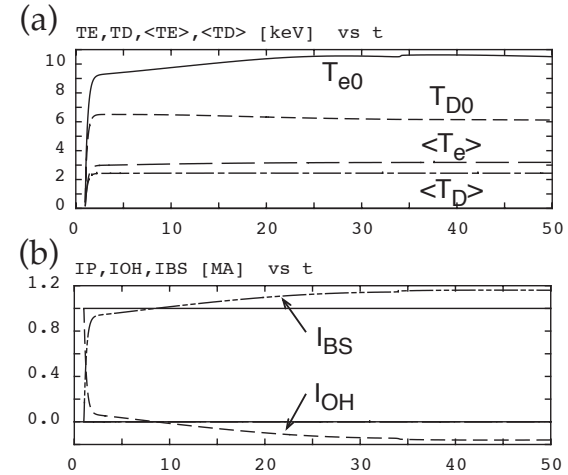
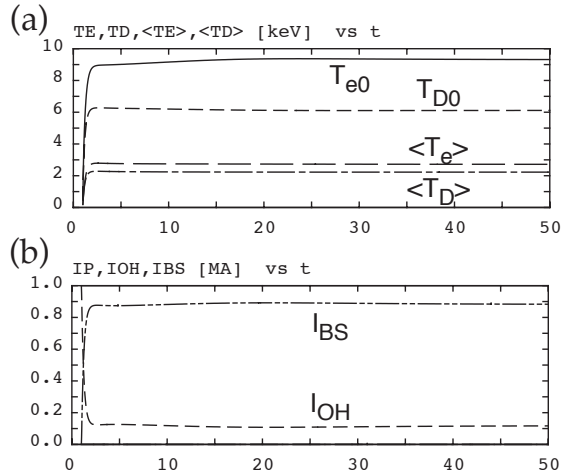
熱拡散係数



高 β_p モード (3)

● $P_H = 24.4 \text{ MW}$

● $P_H = 24.6 \text{ MW}$



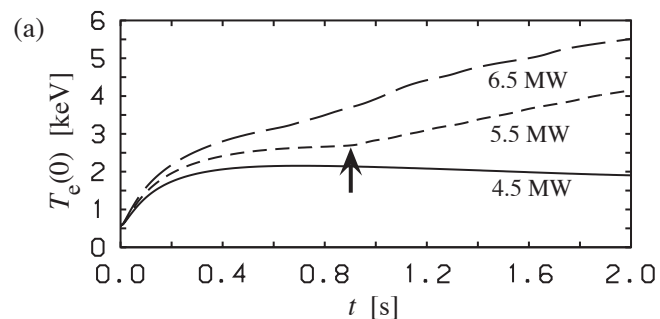
$E \times B$ 回転速度シアの効果

- **輸送の減少** : 小さな s , 大きな α : $F(s, \alpha, \kappa)$

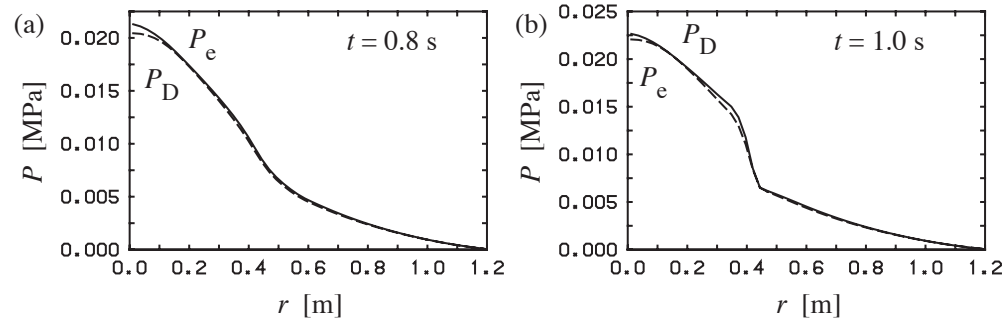
⇒ **回転シアの急激な増加**: $1/[1 + G(s, \alpha)\omega_{E1}^2]$

⇒ **Enhanced ITB への遷移**

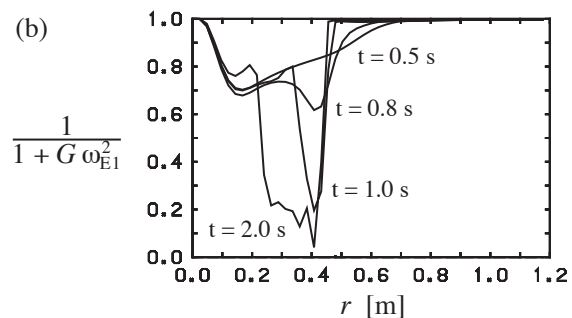
$T_e(0)$ の時間発展



遷移前と遷移後の圧力勾配



回転シアの急速な変化



遷移前と遷移後の熱拡散係数

