

# トカマク理論・シミュレーション開発研究の展望

平成16年1月27日

日本原子力研究所  
炉心プラズマ研究部 プラズマ理論研究室

岸本 泰明

# 理論・シミュレーションの役割

## ITER

微小散逸プラズマの“燃焼”に伴う  
“自律構造形成”

第1フェーズ(誘導運転): 高い信頼性  
第2フェーズ(定常運転): 大きな挑戦

## 国内重点化トカマク

高ベータ・定常プラズマにおける  
“自律構造形成”

非線形性の強い多階層・物理複合  
システムの理解と制御

## 高性能発電実証トカマクプラント

燃焼を伴う高ベータ定常プラズマの自律構造形成

高次の非線形性の支配する新しい物質状態  
非線形性・自律性の制御(21世紀の科学)

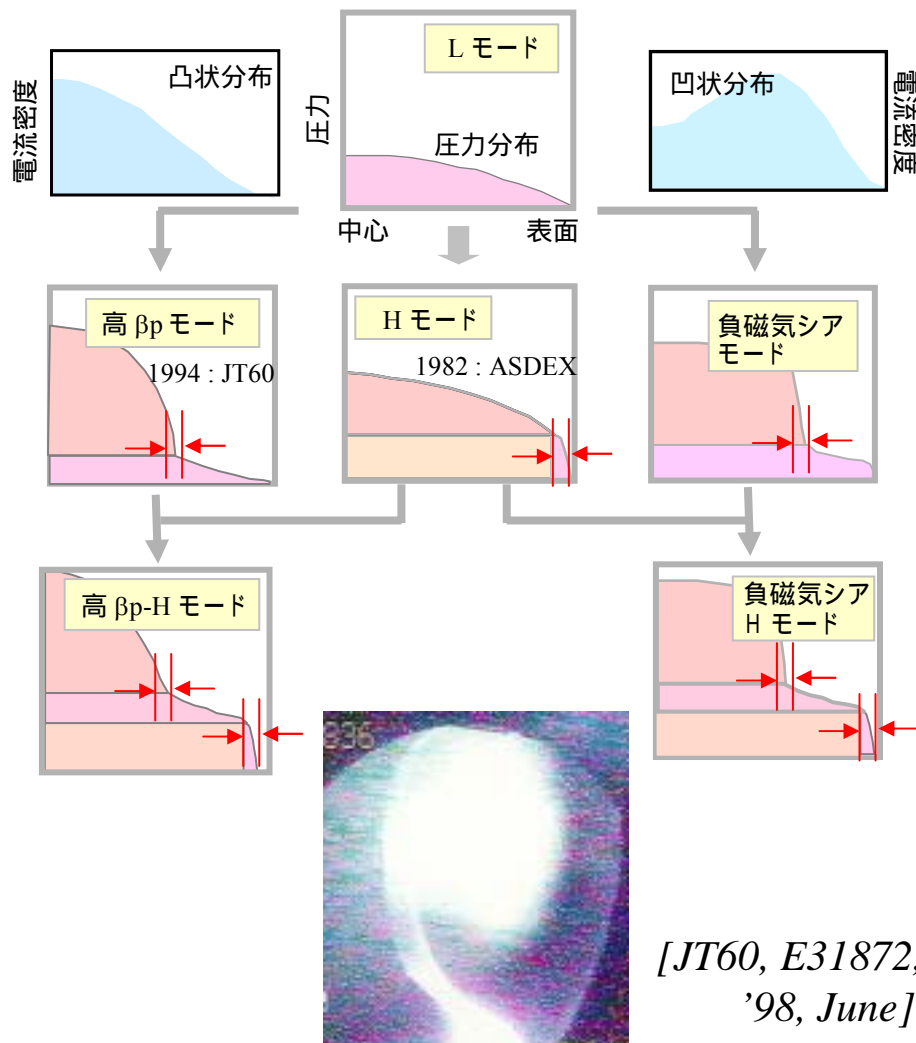
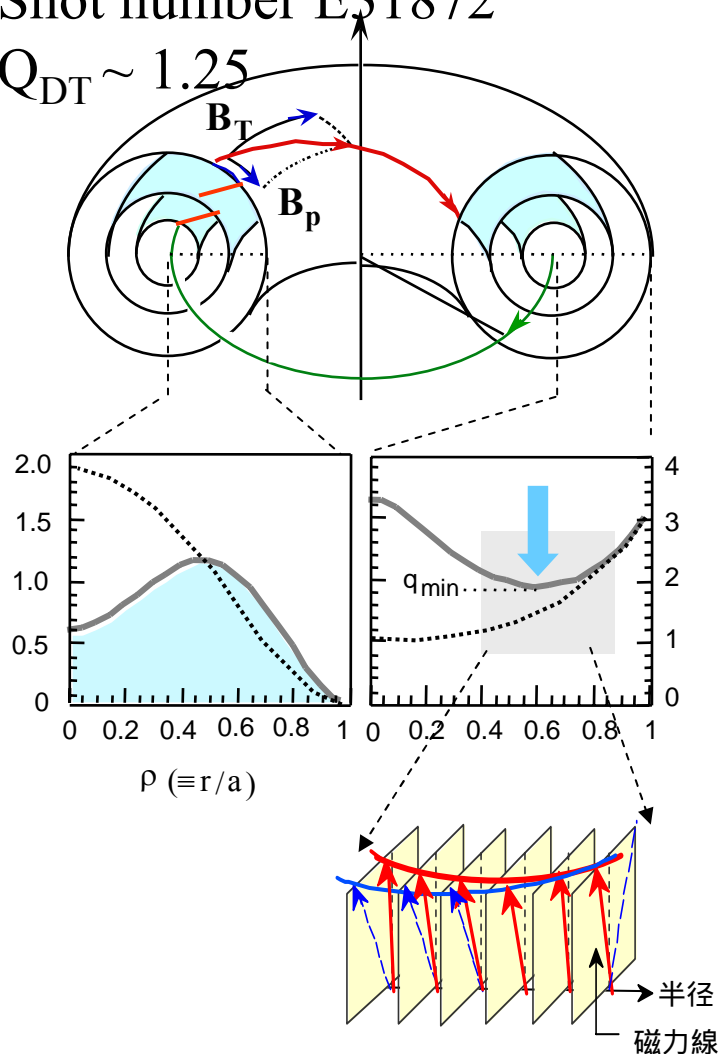
- 時空間スケールの異なる複数の要因が関与した複雑現象 (実験的検証が困難)
- シミュレーションによる複雑現象の背後にある因果関係を理解・要素還元
- 現象を制御する手段の開発・検証、異なった領域での現象を予測

# トカマクプラズマにおける磁場構造と様々な分布形成

June 11, 1998 :

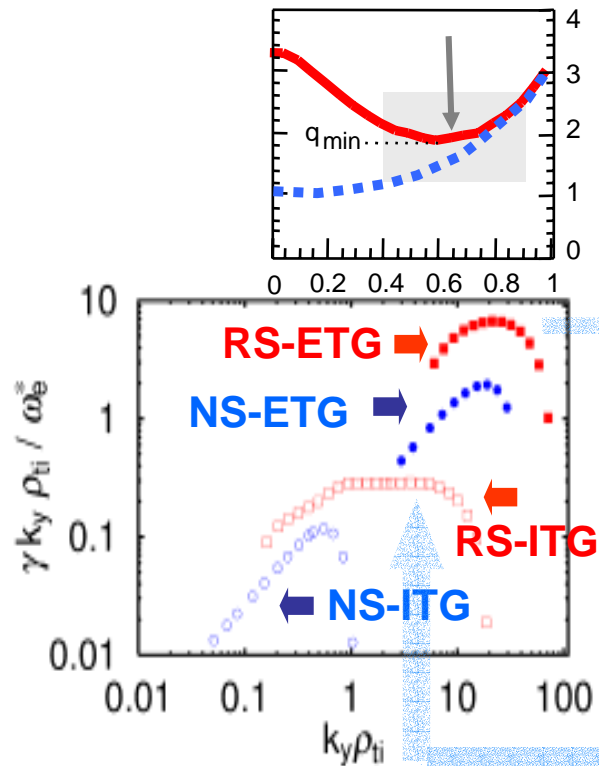
Shot number E31872

$Q_{DT} \sim 1.25$

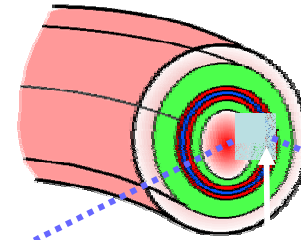


[JT60, E31872,  
'98, June]

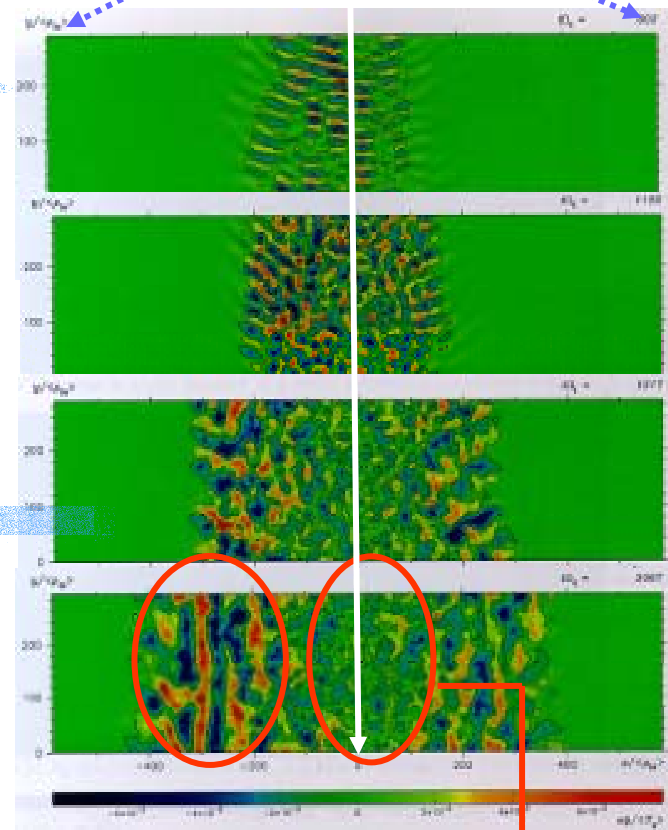
# 例：強い“非線形性”がもたらす事象



線形概念からはより不安定



[Idomura et al.  
PoP, 02]



RS-ITG 乱流抑制

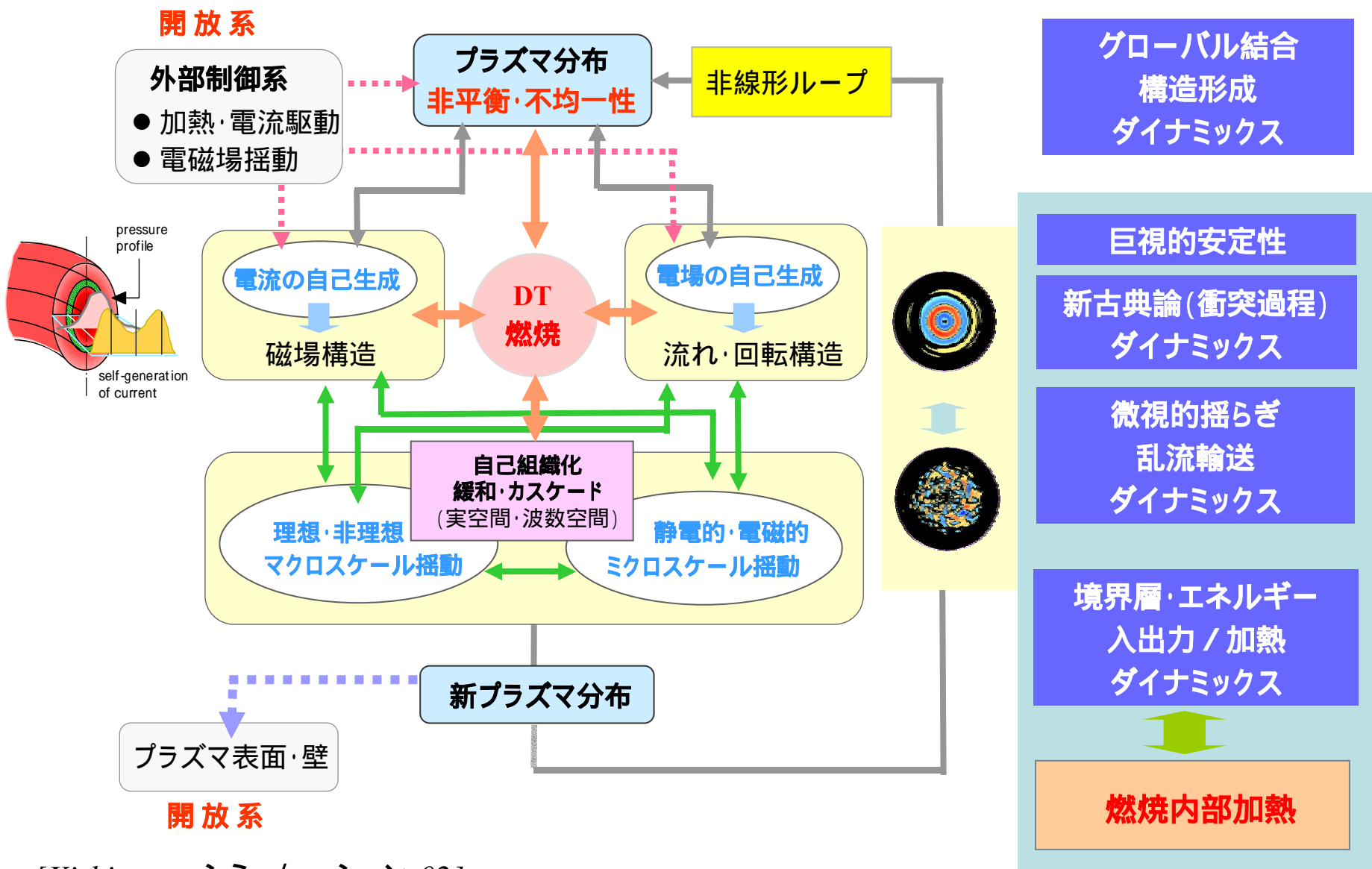


構造形成の起源は乱流エネルギー

強い層流生成  
乱流の抑制

強いETG 乱流状態

# 構造形成の背景： 多階層・複合系プラズマ

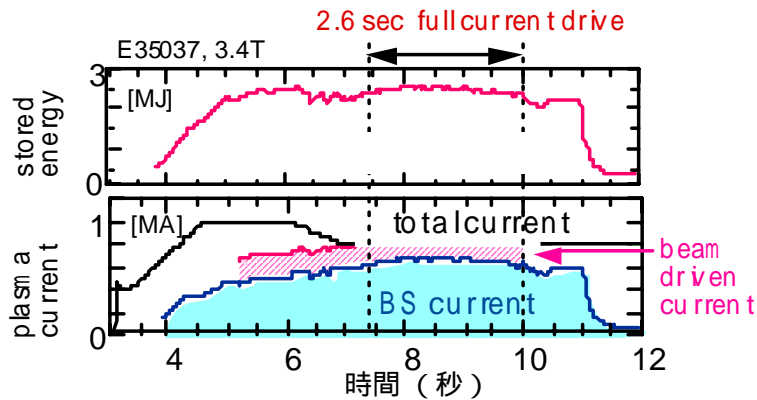


# 非線形ループ構造における固定点の存在

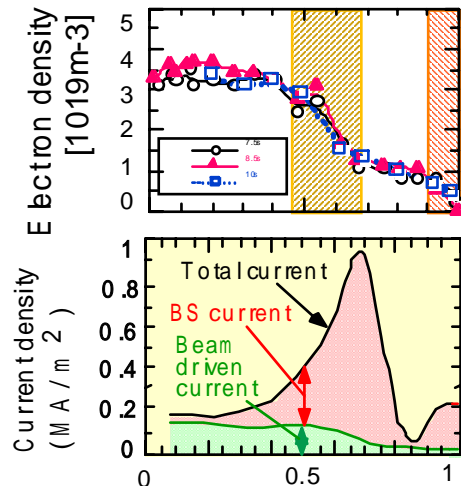
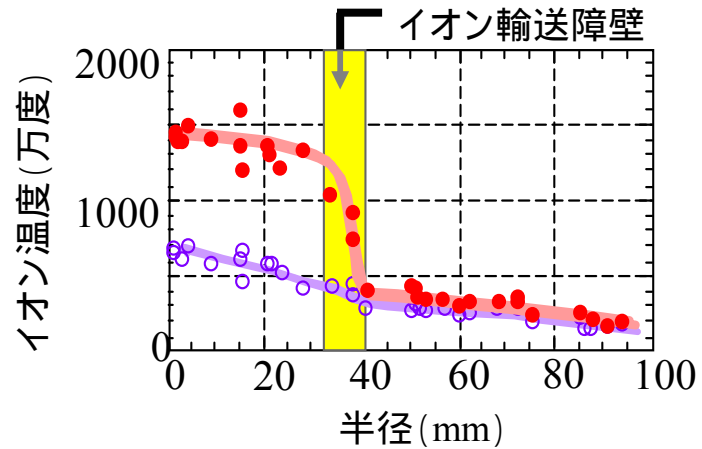
内部・外部輸送障壁共存

非誘導完全電流駆動

・ 80% 自発電流 + 20% ビーム電流



内部輸送障壁の1分間定常維持: TRIAM



cf. feedback control

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x})$$

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{G}(\mathbf{X}; \mathbf{F}_{\text{ext}})$$

$$\mathbf{X} = (T_j, n_j, E_r, V_\theta, V_\phi, \tilde{\phi}, \tilde{B}, \dots)$$

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = (P_j^{(H)}, J_j^{(CD)}, S_j, \mathbf{M}, \delta\tilde{B}, \dots)$$

準定常固定点の存在

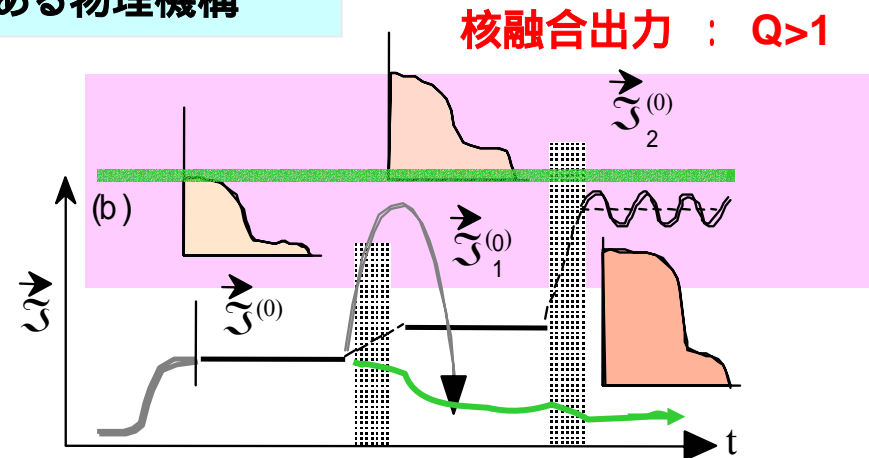
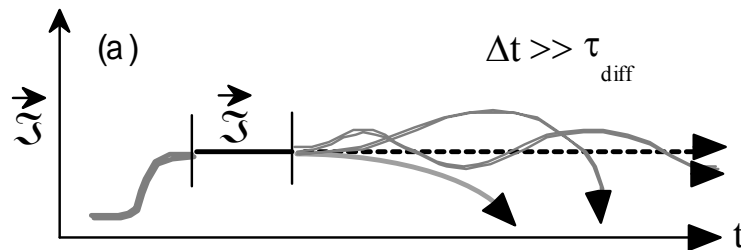
$$\mathbf{X}^{(0)} = \mathfrak{J}(\mathbf{F}_{\text{ext}})$$

[Fujita, et al., PRL, '01]

# 高性能・定常・燃焼プラズマの課題

## 国内重点化トカマク

- 固定点の周りの解の力学構造と安定性 / 敏感性
- 電流拡散時間に関わるプラズマの長時間ダイナミクス
- 固定点に導く“遷移パラメータとその背後にある物理機構



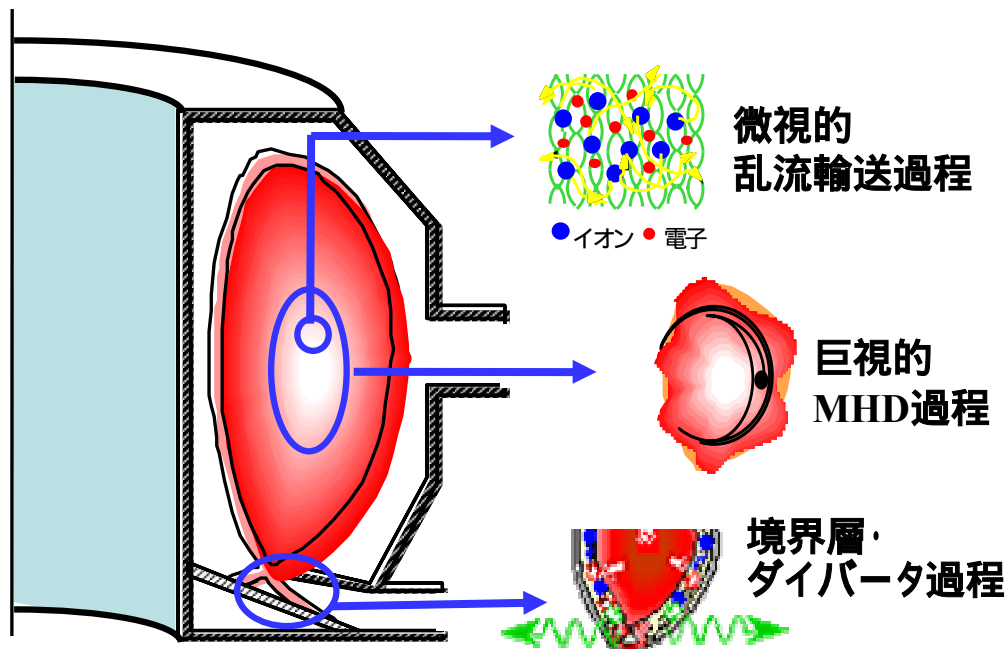
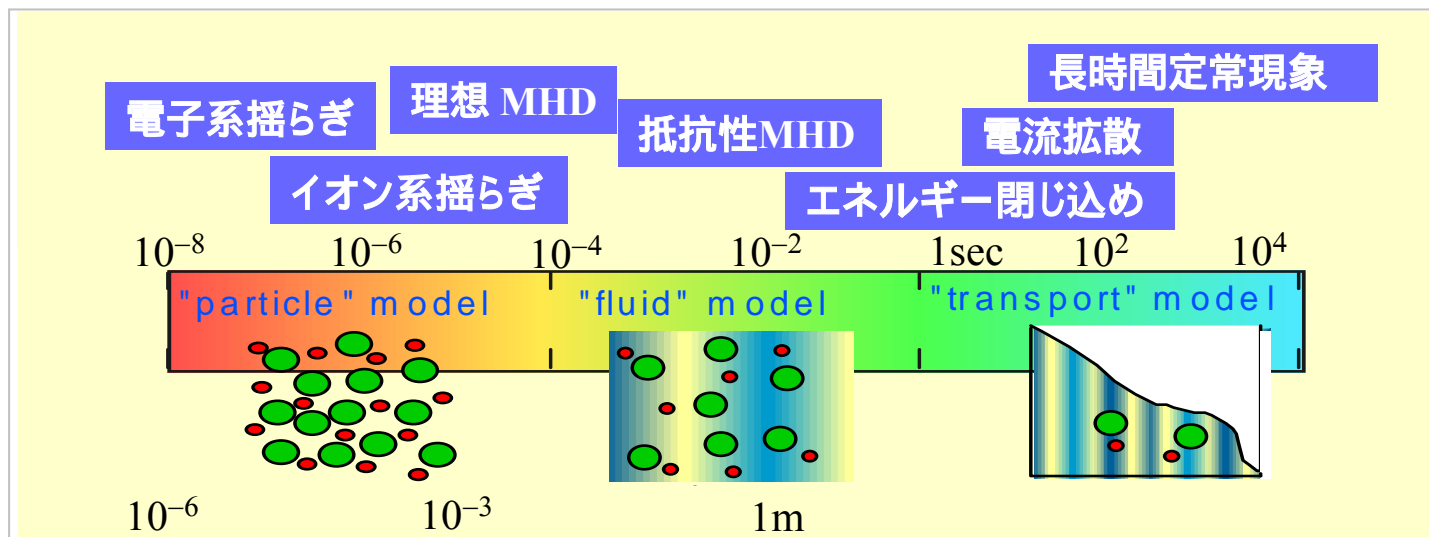
## ITER

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{G}(\mathbf{X}; P_\alpha(x); \mathbf{F}_{\text{ext}}) \quad P_\alpha = n^2 f_{\text{DT}}^2 \langle \sigma v \rangle_{\text{DT}} \epsilon_\alpha [1 - f_{\text{MHD}} - f_{\text{rpple}}]$$

弱燃焼状態 ( $Q < 10$ ) :  $\mathbf{X}_{(\text{weak burn})} = \mathfrak{I}(\mathbf{F}_{\text{ext}}) + \delta \mathfrak{I}$  (摂動的理論予測)

強燃焼状態 ( $Q > 10$ ) : 新しい燃焼ダイナミクスの可能性 / 自己生成されるプラズマ制御

# 多階層・複合系としてのトカマクプラズマ



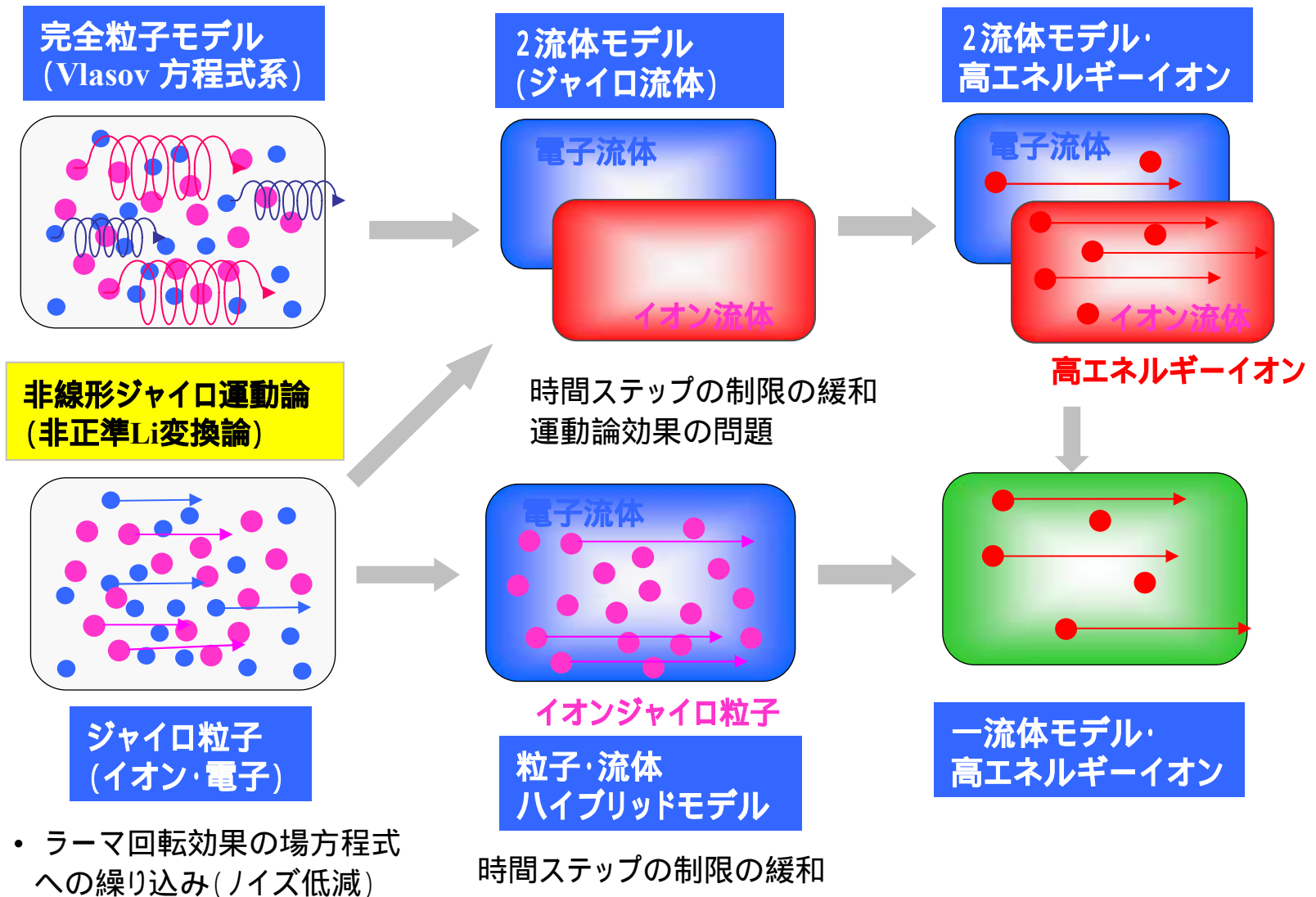
## 超高温核融合プラズマの特性

- 時空間スケールの多階層性
- 物理過程の複合性
- 微小な散逸 / 記憶保持
- 流体特性と粒子特性

“保存性”を意識した理論構築  
 “第一原理”への回帰・立脚  
 “基礎科学”に深く関与

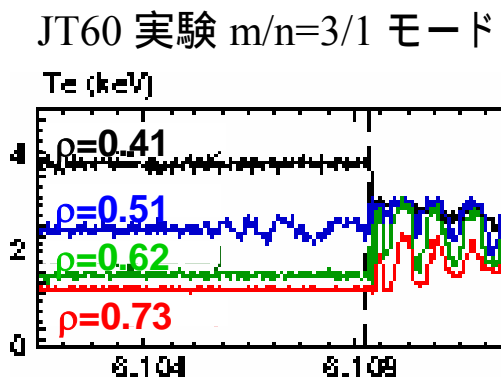
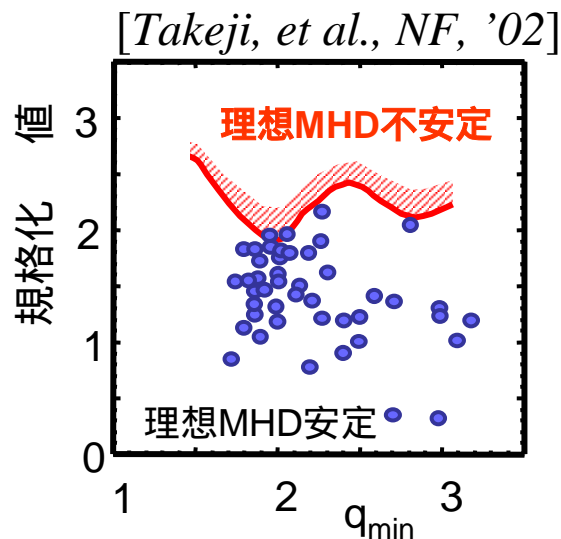


# 様々な核融合プラズマシミュレーション手法

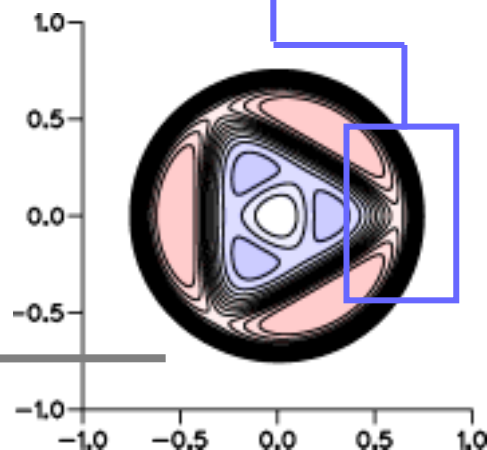
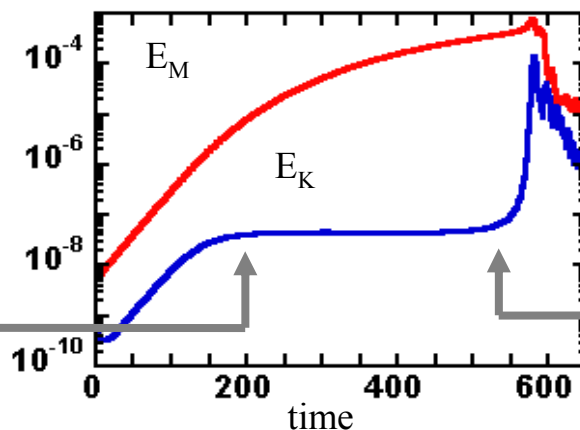
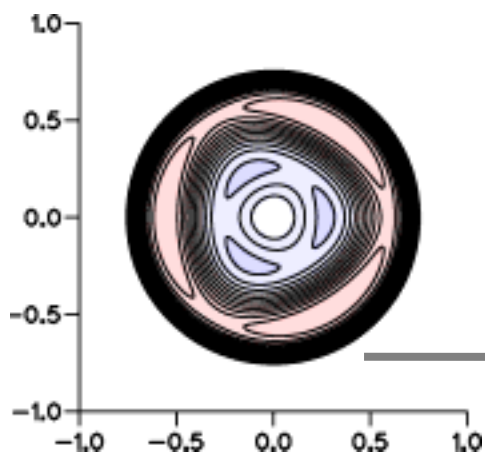
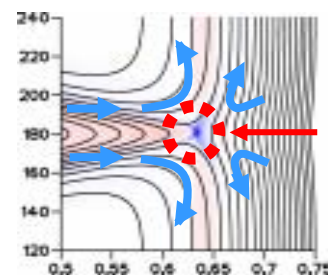


# 例 1: 一流体 非線形MHDシミュレーション

反転磁気シアプラズマの低ベータディスラプションの物理機構の解明



- 磁場の三角構造変形
- “電流点”の形成による突発現象の発見



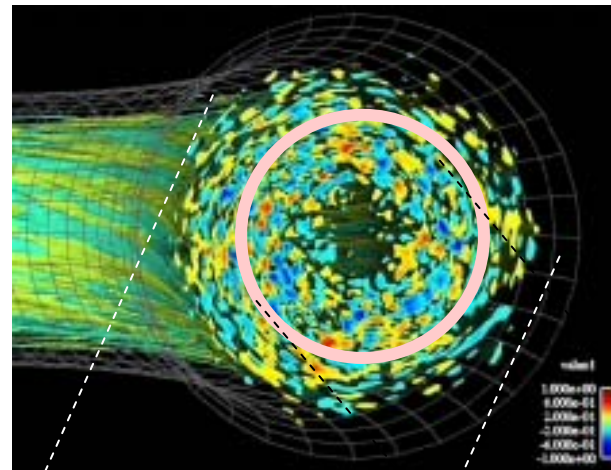
[Ishii, et al., PRL, '02]

# 例2： 乱流のトロイダルシミュレーション

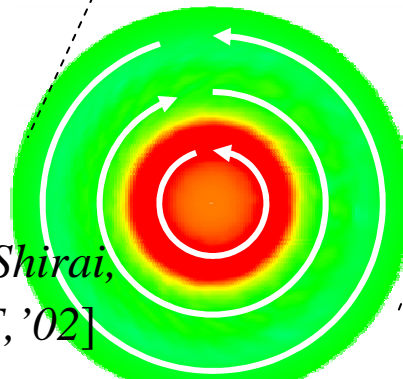
層流生成を含めたイオン系輸送の評価(実装置サイズ)

イオン系 ジャイロ粒子シミュレーション

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

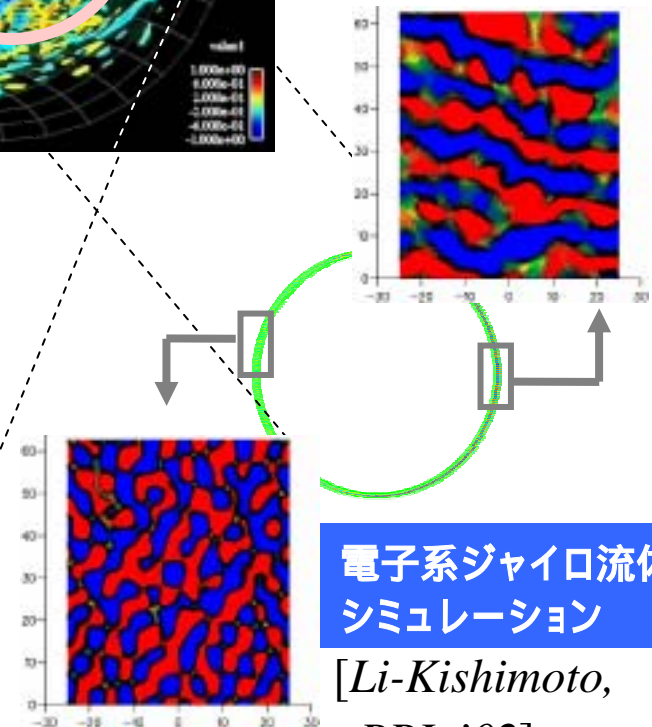


- ストリーマの出現  
(トラス外側)  
による異常電子輸送



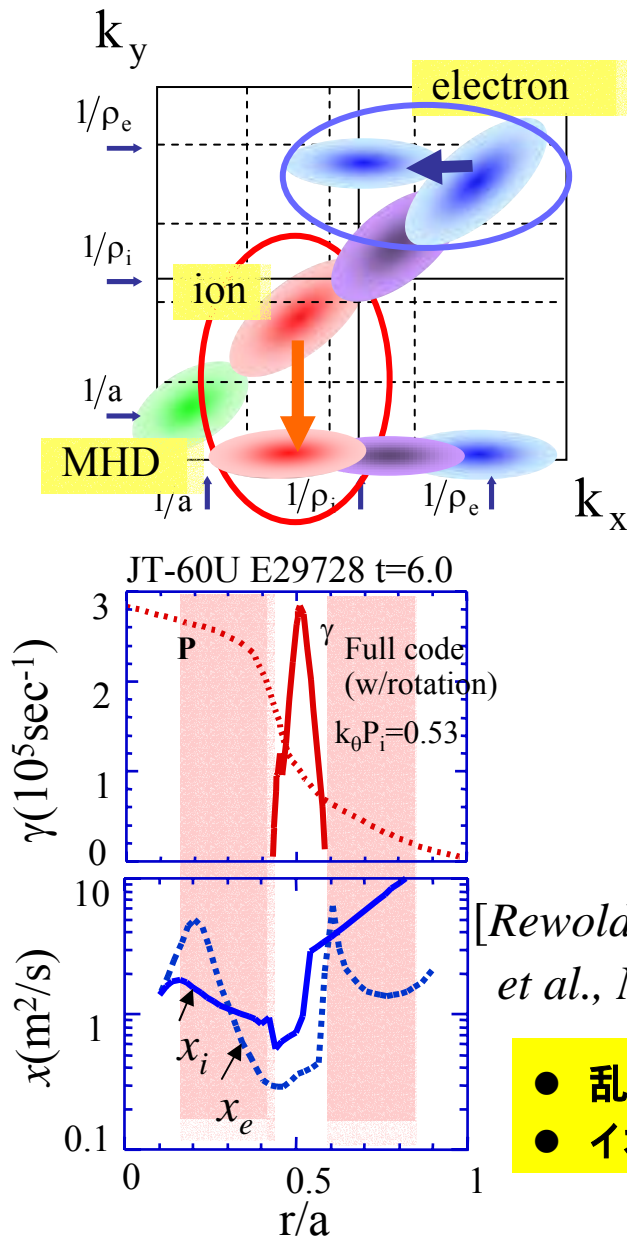
[Rewoldt-Shirai,  
et al., NF, '02]

- 乱流の相関長と帯状流生成
- イオン輸送レベルの再現

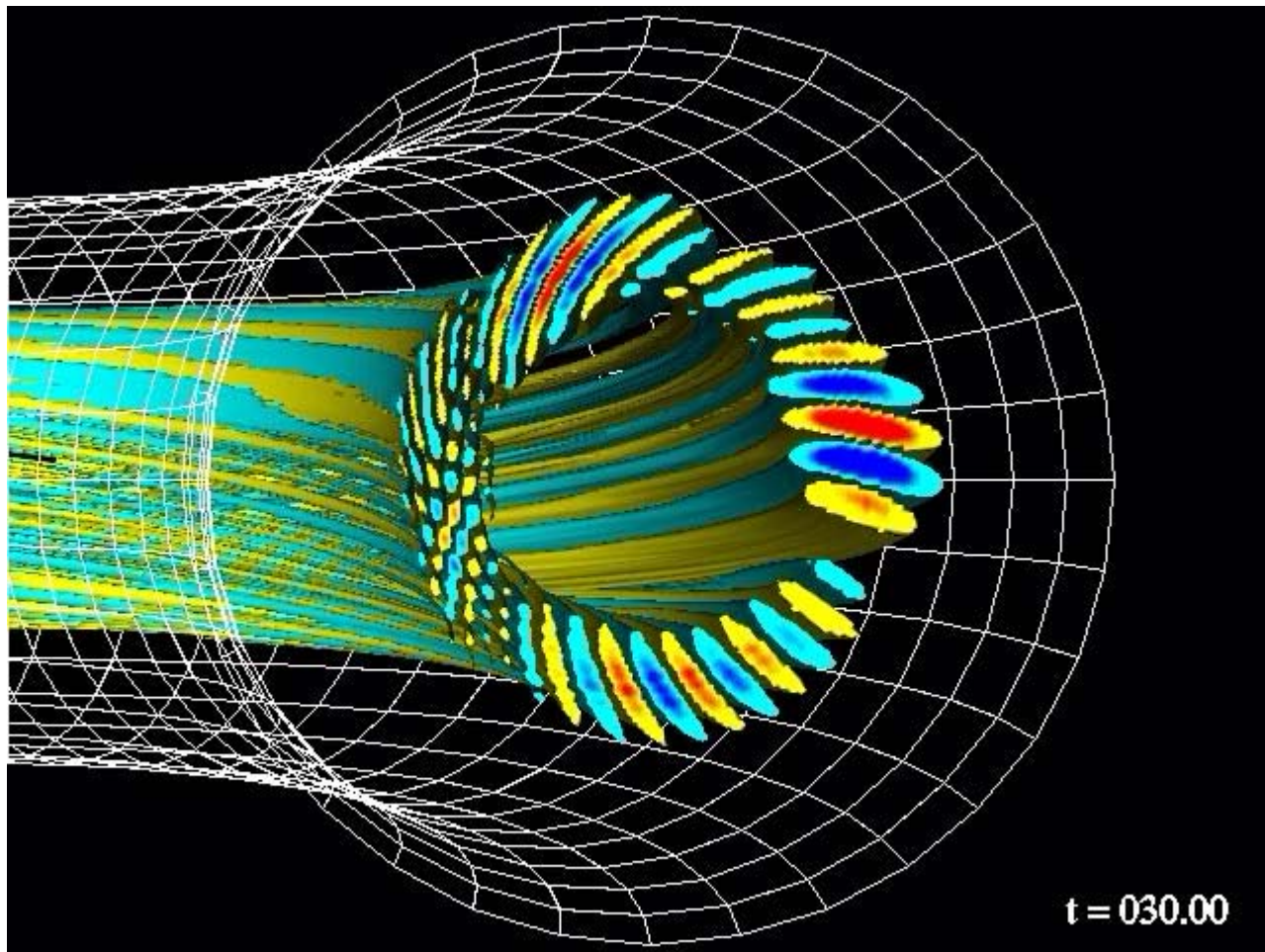


電子系ジャイロ流体  
シミュレーション

[Li-Kishimoto,  
PRL, '02]



## 例2： 乱流のトロイダルシミュレーション

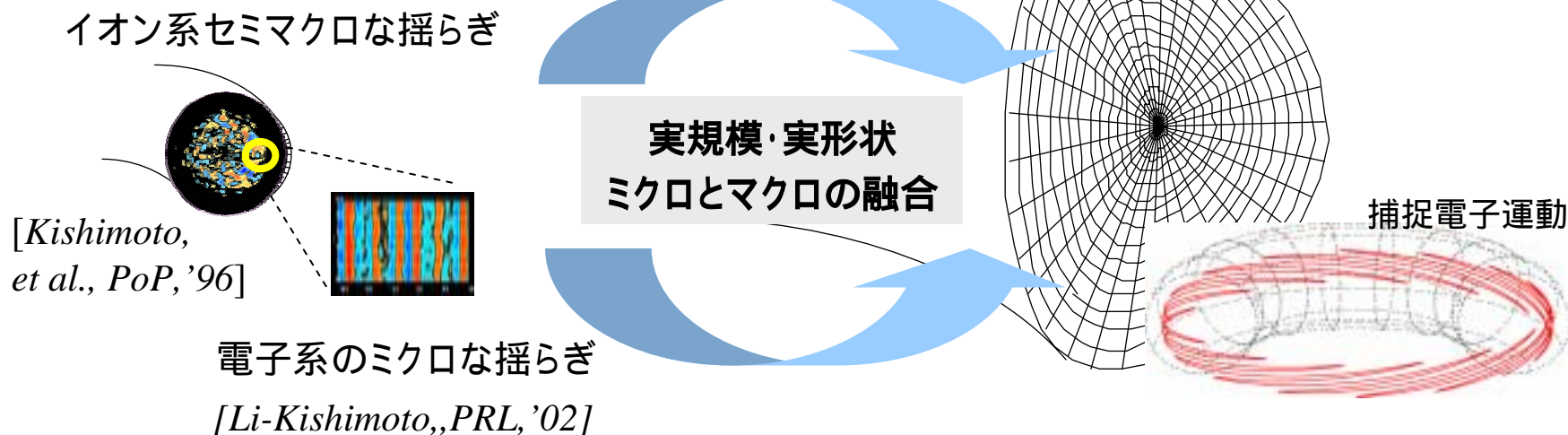


[Idomura, et al., NF, '02]

# ジャイロ粒子モデルに基づくシミュレーション

$$\frac{\text{プラズマ半径 } (a)}{\text{イオン旋回半径 } (\rho_i)} = 100 - 200$$

$$\frac{a}{\rho_i} = 500 - 1000$$



## これまでのシミュレーション

- 小さな装置サイズ
- イオン系と電子系を個別に解析
- 計算規模: 0.5TFLOPS

## これからのシミュレーション

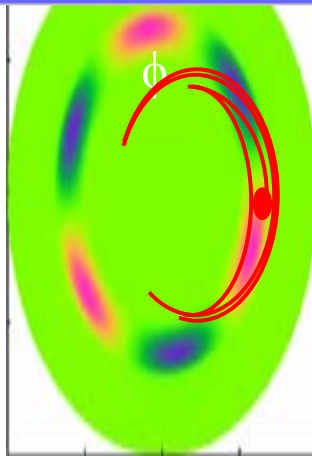
- “ITER” を想定した実規模・実形状
- イオン系と電子系を統一した多階層モデル
- 電磁効果・散逸効果
- 必要計算規模: 100-200 TFLOPS



# 多階層・複合系トロイダルシミュレーション

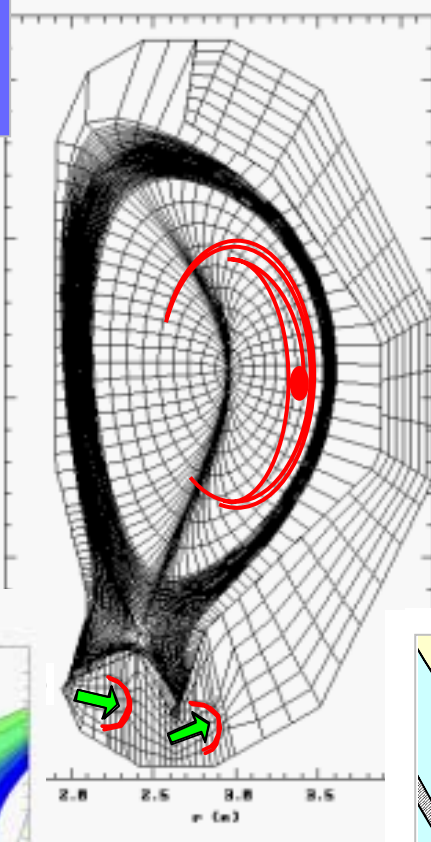
- 核燃焼状況下における非線形ループ構造の同定
- 燃焼プラズマの(長時間)予測シミュレーション

非線形 MHD シミュレーション  
(アルファ粒子駆動MHD)

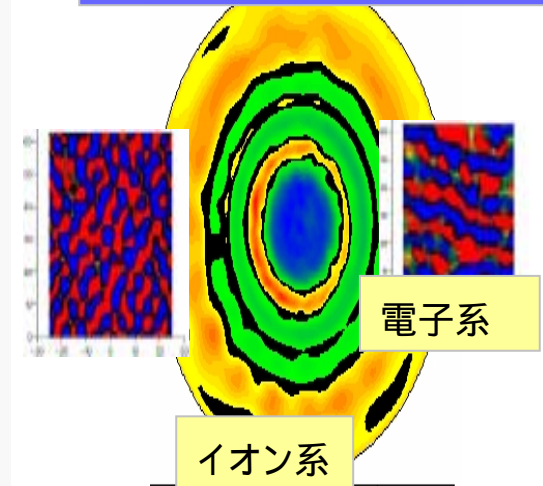


[Miyato, et al.,  
Toki-Conf, '03]

- 二流体  
ジャイロ流体モデル
- 各階層の定量的再現  
要素間の結合
- 必要計算規模:  
100TFLOPS

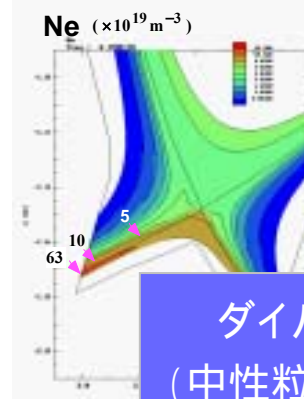


乱流シミュレーション  
(乱流・層流混合状態)

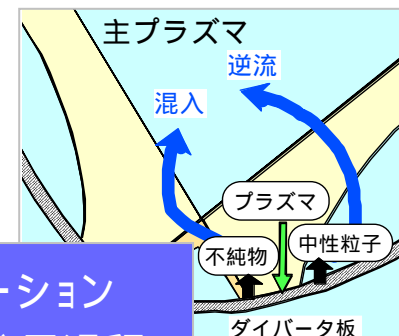


電子系

イオン系

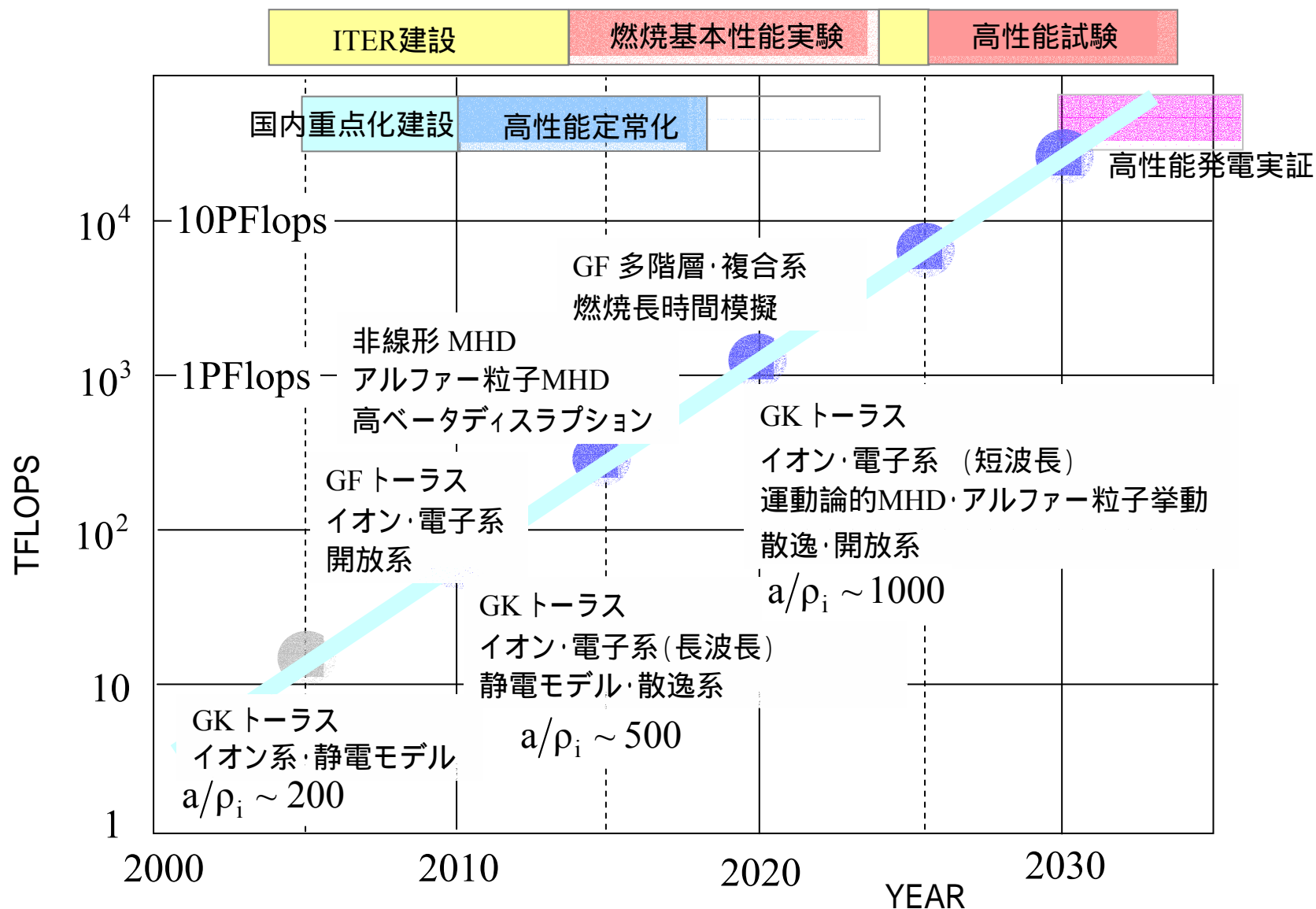


ダイバータ・境界シミュレーション  
(中性粒子・不純物・原子 / 分子過程)



[Shimizu,  
J.Nucl. Mater., '03]

# トカマクシミュレーションのマイルストーン



# まとめと展望

## ■ トカマク理論・シミュレーション研究の飛躍的な進展

- “構造形成” “自律性” に準拠した開発研究
- 広いダイナミックレンジの非線形ダイナミックスの理解と制御手法の開拓

e.g. “揺らぎ ( $E_{\text{fluct}}$ )” = “乱流 ( $E_{\text{turb}}$ )” + “層流 ( $E_{\text{zonal}}$ )”

$\eta \equiv \frac{E_{\text{zonal}}}{E_{\text{turb}} + E_{\text{zonal}}}$       揺らぎの形態の制御 :  
「大きな揺らぎのエネルギー」と「高い閉じ込め性能」 両立概念

## ■ 計算科学に準拠するトカマク開発研究の展開

- 広範囲の理論との連携（原理・原則としての要素還元が必要）
- 分野横断的・チーム指向型研究による展開が不可欠

e.g. 米国 SciDAC (Scientific Discovery through Advanced Computing)

“プラズマ物理” + “応用数学” + “宇宙物理” → 実験室天文学

## ■ 50年に渡る核融合開発の期間に関する議論

- 「プラズマ物理 (原理・原則)」の構築と同時進行する研究開発スタイル  
(宇宙の構造に関する科学 : 発展途上)
- 資源配分を含め、理論・シミュレーションを含む今後10 - 20年の開発戦略が重要