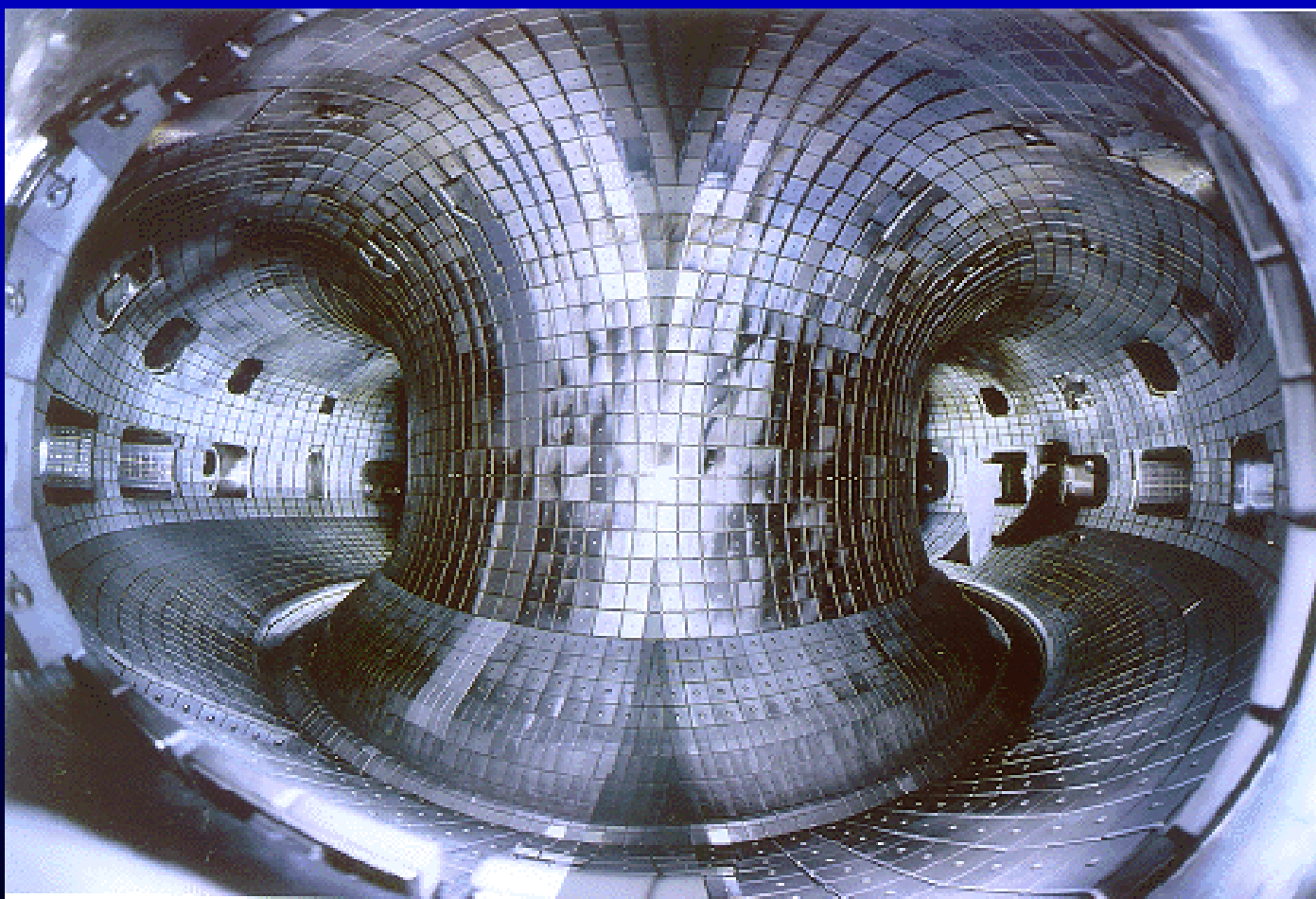


分科会C:スーパーコンピューティングの挑戦 -明日へのメッセージ-

# 核融合プラズマ乱流の第一原理シミュレーション

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 井戸村泰宏

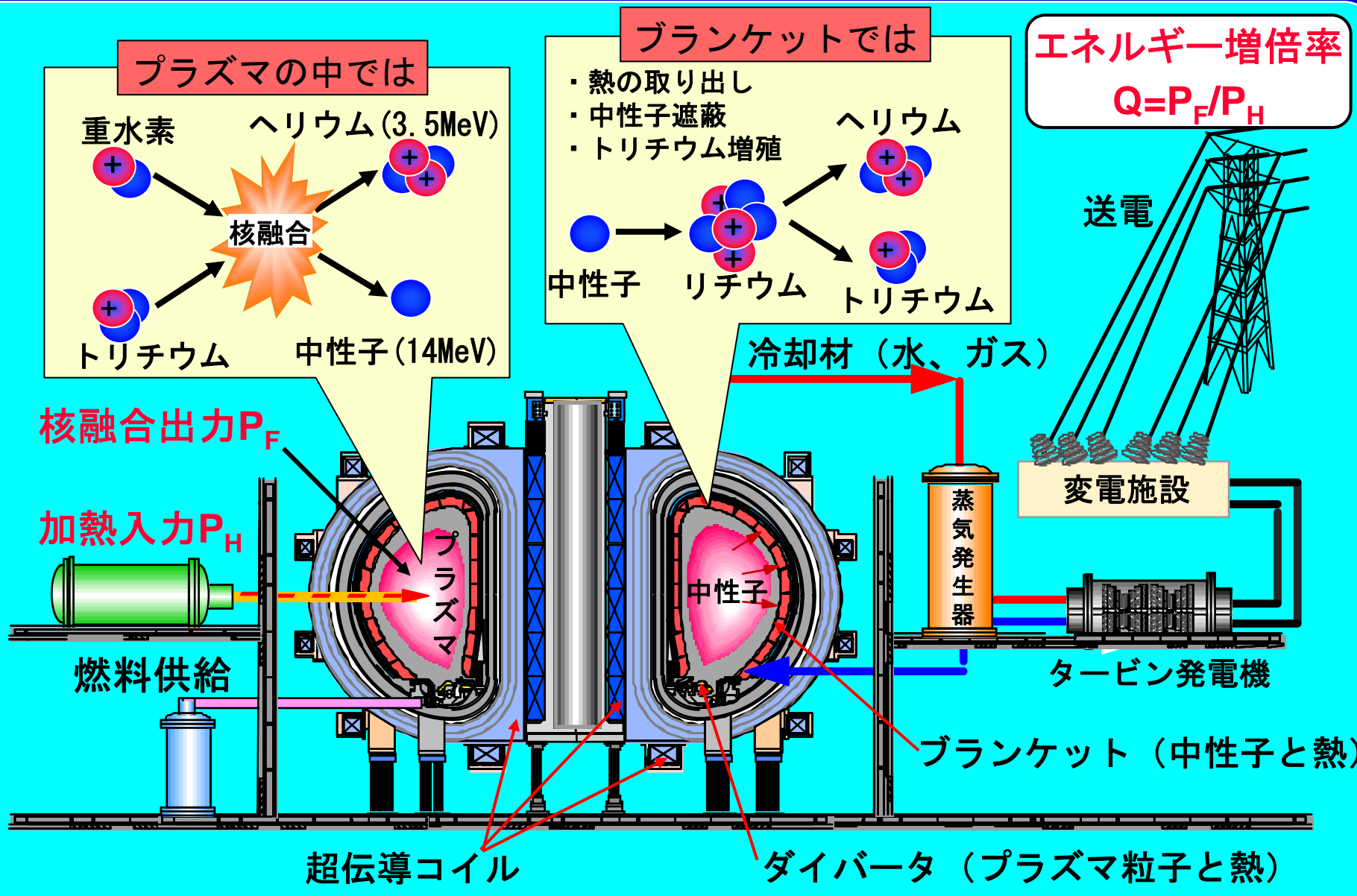


原子力機構に設置されている臨界プラズマ試験装置JT60Uの真空容器内部

# 内容

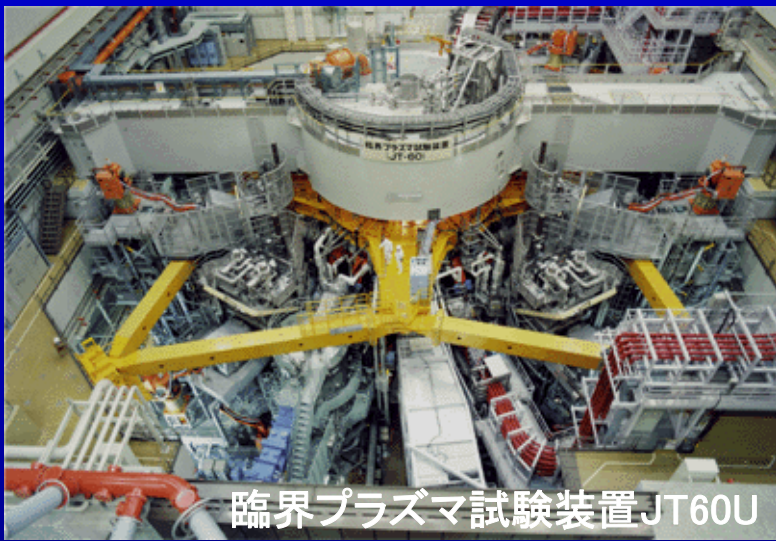
- 1) 核融合エネルギー開発における乱流輸送研究
- 2) 核融合プラズマ乱流の第一原理モデル
- 3) 核融合プラズマ乱流シミュレーションの応用例
- 4) ペタフロップス級計算機に向けたコード開発

# 核融合発電のしくみ



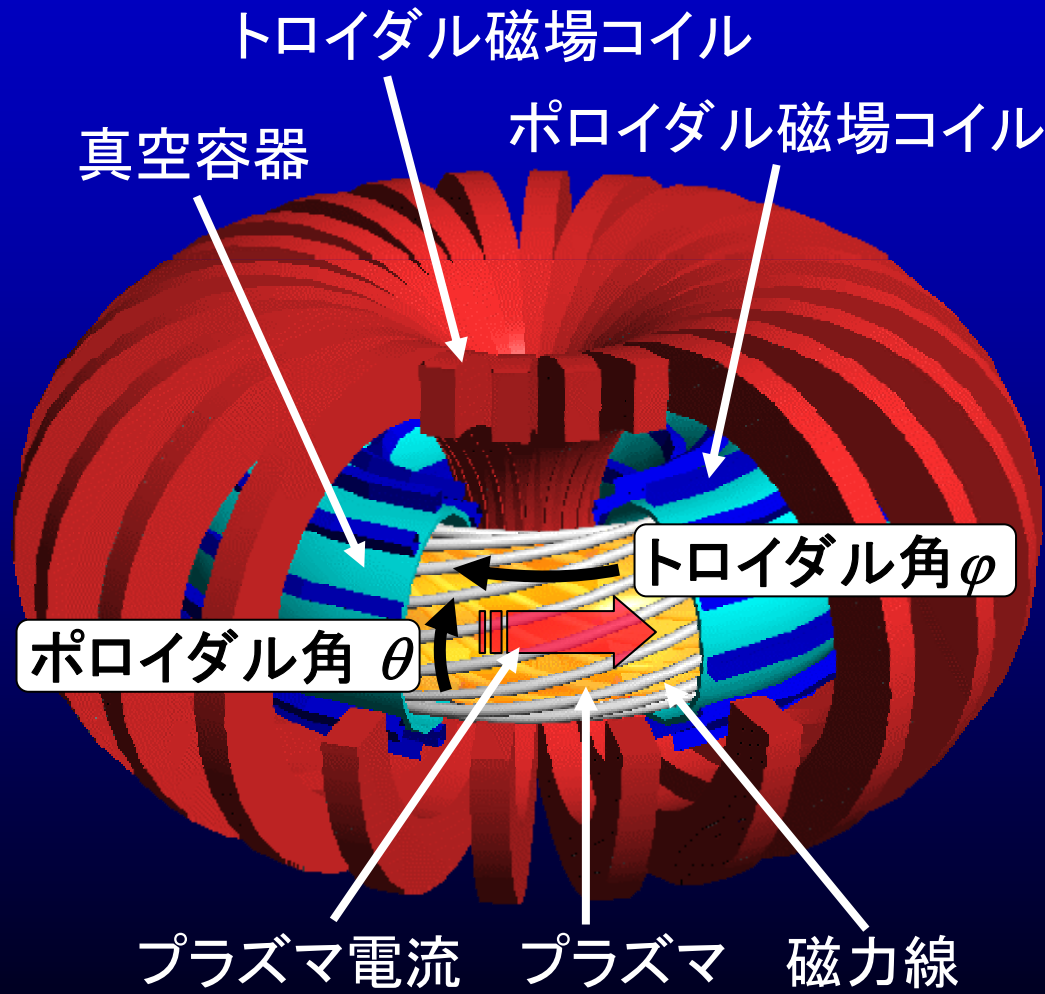
# トカマク型磁場閉じ込め核融合実験

1996年にブレークイーブン $Q=1$ を達成



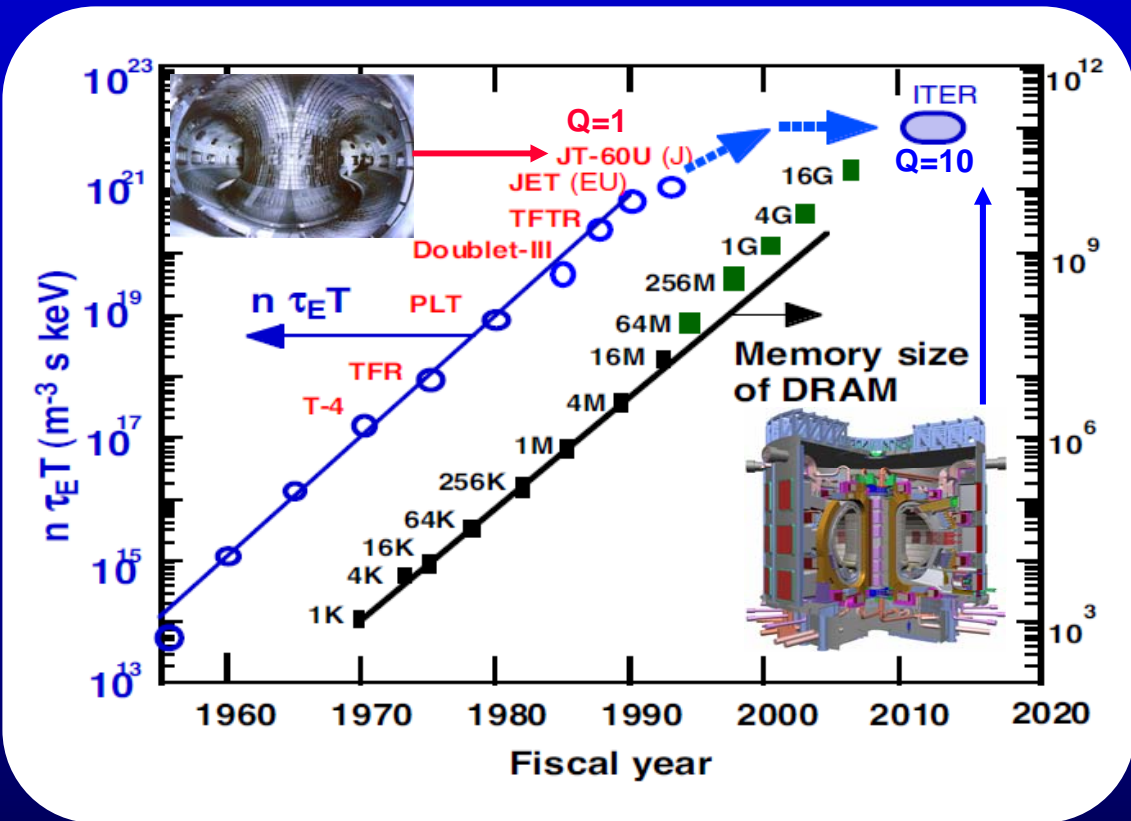
臨界プラズマ試験装置JT60U

	JT60U	ITER
主半径	3.4m	6.2m
小半径	1m	2m
トロイダル磁場	4T	5.3T
プラズマ電流	3MA	15MA
放電時間	65s	~1000s
粒子密度	$\sim 10^{19}m^{-3}$	-
イオン温度	$\sim 40keV$	-





# トカマク実験における核融合プラズマ性能の進展



## 主要トカマク装置

TFTR (米): 1982~1997

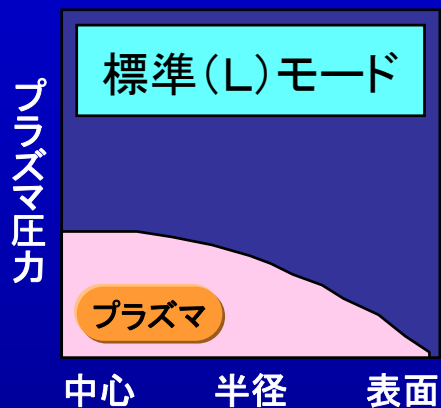
JET (欧): 1983~

JT60U (日): 1985~

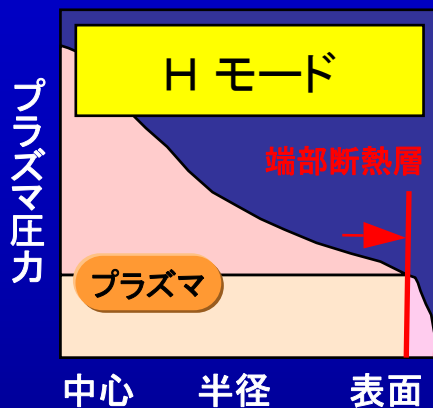
ITER (日,米,欧,露,中,韓,印):  
2016~

- トカマク実験は半世紀をかけて核融合炉の領域に進歩してきた
- JT60U (日本)、JET (欧州)においてブレークイーブンQ=1を達成
- 次世代トカマク実験、国際熱核融合実験炉ITERの目標値はQ=10
  - 核融合炉の科学的・工学的可能性が実証される段階に！

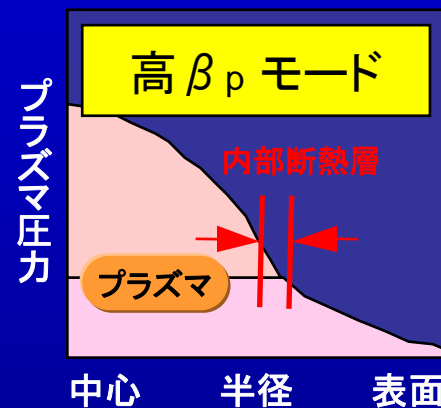
# 乱流輸送の抑制による炉心プラズマ性能向上



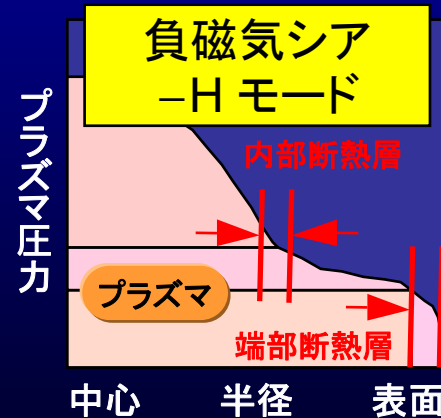
閉じ込め改善  
 (断熱層をつくる)



ドイツ(1982年)

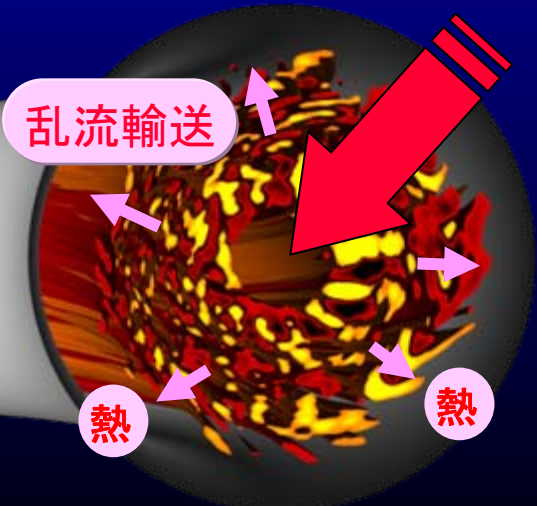


原研(1994年)



原研(1996年)

外部加熱/核融合出力



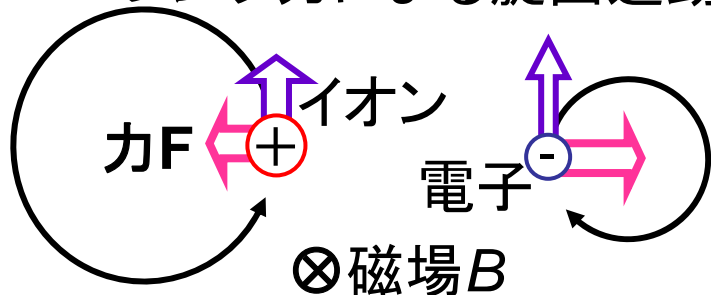
- プラズマ中に発生する乱流によって熱・粒子が拡散
  - 核融合反応に十分な高温の効率的な維持には乱流輸送の抑制・制御が重要
- 核融合炉のサイズ・経済性

# 内容

- 1) 核融合エネルギー開発における乱流輸送研究
- 2) 核融合プラズマ乱流の第一原理モデル
- 3) 核融合プラズマ乱流シミュレーションの応用例
- 4) ペタフロップス級計算機に向けたコード開発

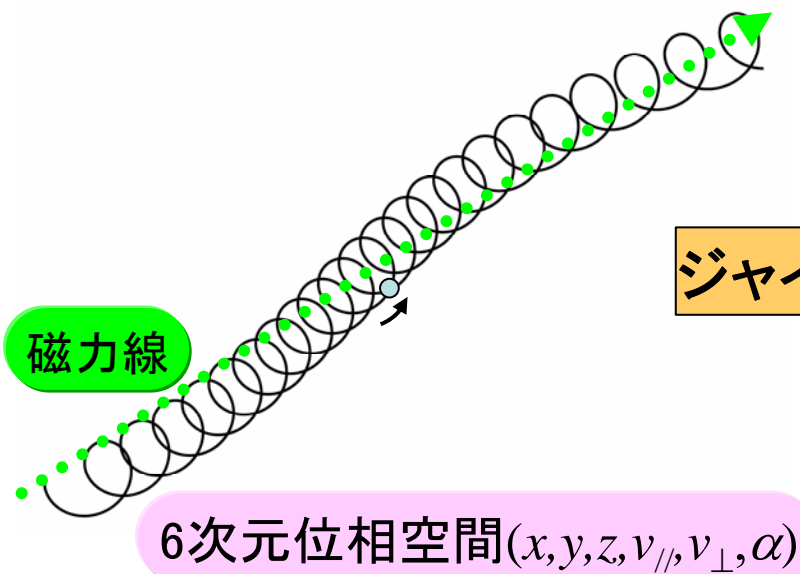
# トカマク中の荷電粒子軌道の性質①

ローレンツ力による旋回運動

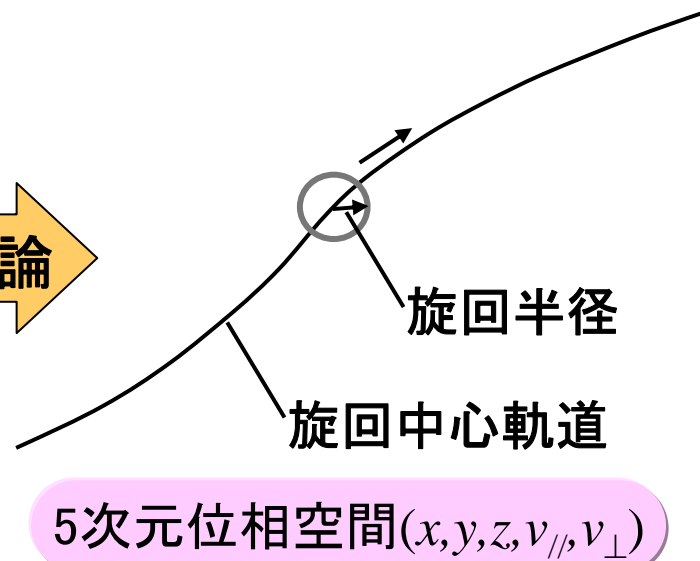


- 乱流の最小スケールが存在する  
イオン半径 $\sim 5\text{mm}$ 、電子半径 $\sim 0.1\text{mm}$
- 速い旋回運動を断熱運動とみなせる  
5次元位相空間におけるジャイロ運動論  
→トカマク乱流の第一原理モデル

速い旋回運動( $\sim 1\text{GHz}$ ) + 遅いドリフト運動( $\sim 100\text{kHz}$ )  
→旋回運動を断熱運動とみなせる(磁気モーメント $\mu$ の保存)

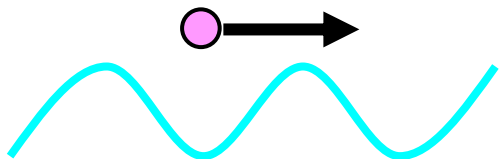


ジャイロ運動論

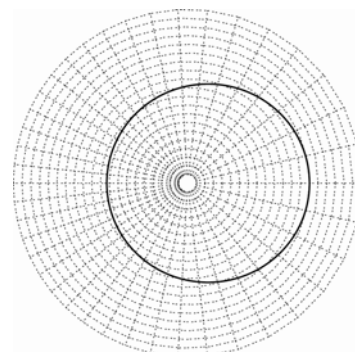
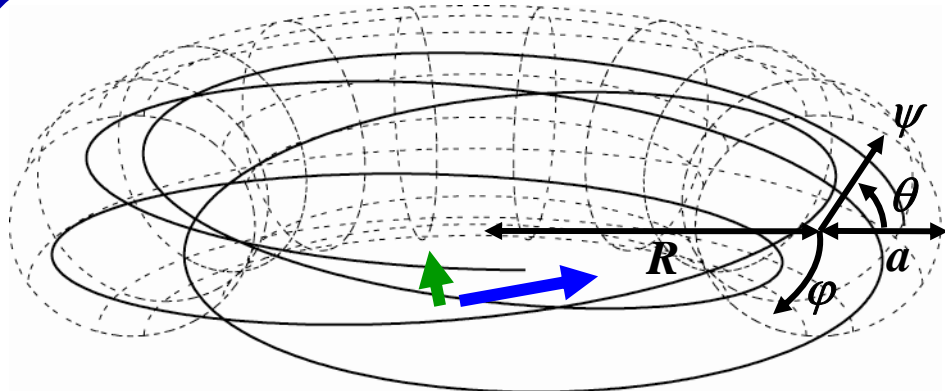


# トカマク中の荷電粒子軌道の性質②

波と粒子の共鳴



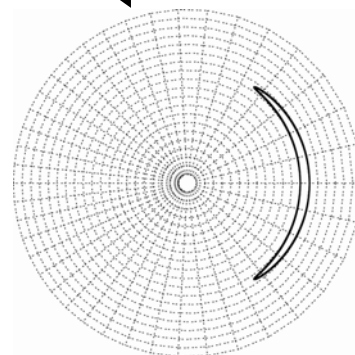
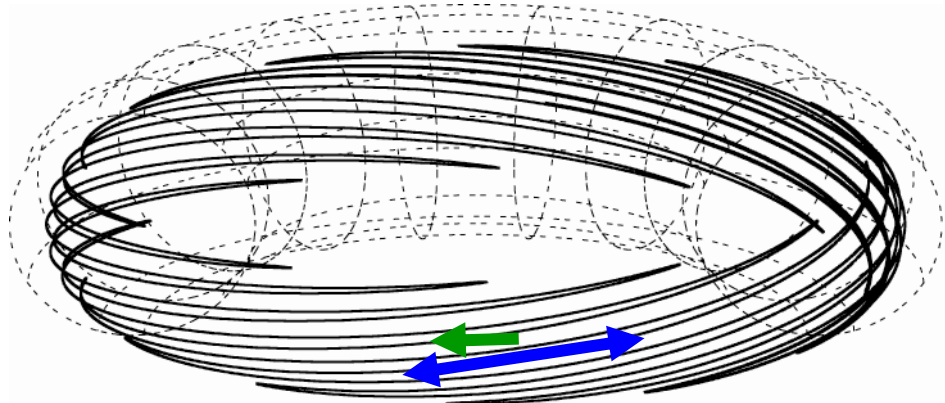
- 波と粒子の共鳴により乱流が励起される
- 共鳴機構により複数の不安定性が存在する  
スラブモード、トロイダルモード、捕捉粒子モード



通過粒子 ( $v_{//}/v_{\perp}$  大)  
平行熱運動 + 磁気ドリフト



ドーナツの内側の磁場が強い

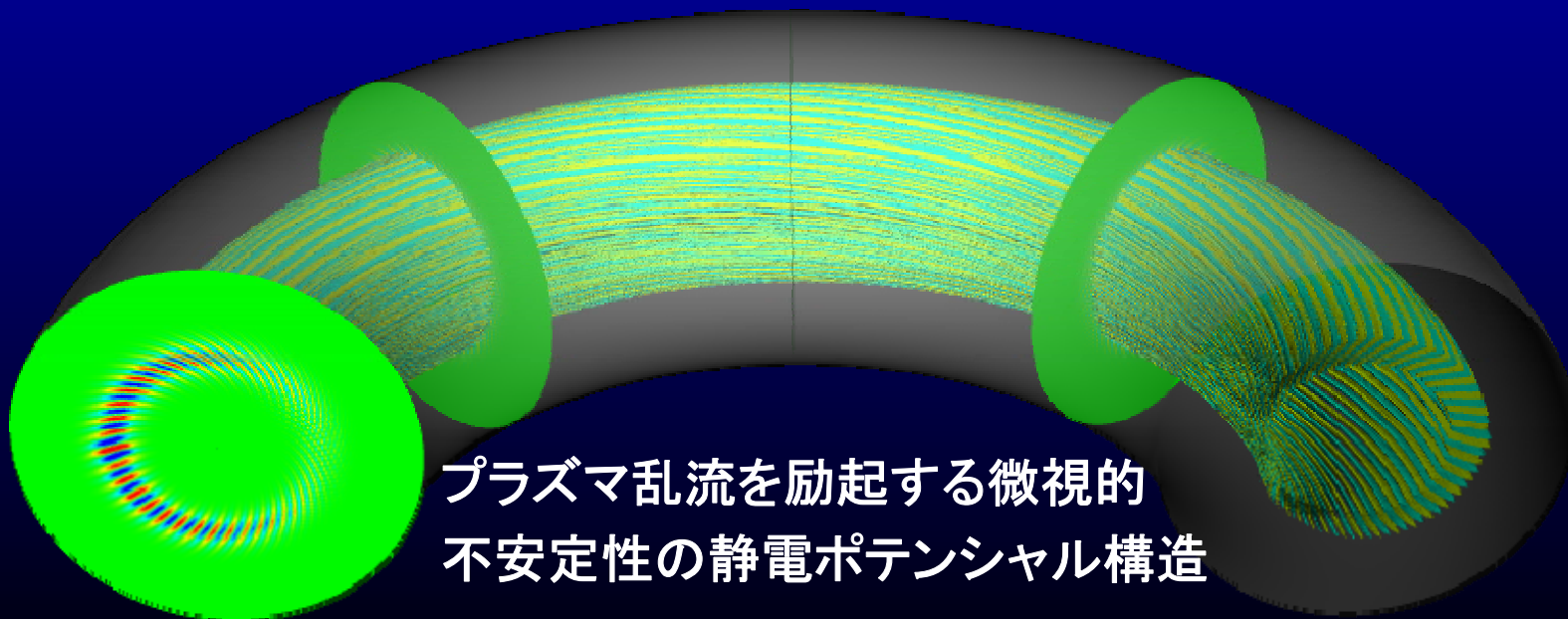


捕捉粒子 ( $v_{//}/v_{\perp}$  小)  
バウンス運動 + トロイダル歳差運動



## トカマク中のプラズマ乱流の物理モデル

- 高温核融合プラズマの記述には5次元運動論モデルが必要
  - 低衝突周波数  $\sim 1\text{kHz}$ , 平均自由行程  $\sim 10\text{km}$
  - 粒子軌道効果が乱流の最小スケールを与える  $Re_{\text{eff}} \sim 100$
  - 波と粒子の共鳴現象により乱流場が励起・減衰される
- トーラス磁場構造が非等方(準2次元的)な乱流構造を決定する  
 →5次元運動論モデルによるトーラス全体の第一原理シミュレーション



プラズマ乱流を励起する微視的  
不安定性の静電ポテンシャル構造

# 核融合プラズマ乱流の第一原理モデル

- 5次元位相空間( $\mathbf{R}, v_{\parallel}, \mu$ )における粒子分布 $f_s$ の連続の式

$$H = \frac{1}{2} m_s v_{\parallel}^2 + \mu B + e_s \langle \phi \rangle_{\alpha}$$

ハミルトニアン

$$\frac{Df_s}{Dt} = \frac{\partial f_s}{\partial t} + \{f_s, H\} = \frac{\partial f_s}{\partial t} + \frac{d\mathbf{R}}{dt} \cdot \nabla f_s + \frac{dv_{\parallel}}{dt} \frac{\partial f_s}{\partial v_{\parallel}} = C(f_s) + S$$

衝突項

熱・粒子源

ジャイロ運動論方程式

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} \equiv \{\mathbf{R}, H\} = v_{\parallel} \mathbf{b} + \frac{c}{e_s B_{\parallel}^*} \mathbf{b} \times (e_s \nabla \langle \phi \rangle_{\alpha} + m_s v_{\parallel}^2 \mathbf{b} \cdot \nabla \mathbf{b} + \mu \nabla B)$$

旋回中心軌道

$$\frac{dv_{\parallel}}{dt} \equiv \{v_{\parallel}, H\} = -\frac{\mathbf{B}^*}{m_s B_{\parallel}^*} \cdot (e_s \nabla \langle \phi \rangle_{\alpha} + \mu \nabla B)$$

磁力線方向速度

$$\mu \equiv \frac{m v_{\perp}^2}{2B} = \text{const.}, \quad \langle \phi \rangle_{\alpha} \equiv \frac{1}{2\pi} \oint \phi d\alpha, \quad \mathbf{B}^* = \mathbf{B} + \frac{c m_s v_{\parallel}}{e_s} \nabla_{\mathbf{R}} \times \mathbf{b}$$

- 自己無撞着な揺らぎの電場を決めるポアソン方程式

$$-\nabla^2 \phi = \sum_s \left[ 4\pi e_s \int f_s \delta([\mathbf{R} + \boldsymbol{\rho}_s] - \mathbf{x}) m_s^2 B_{\parallel}^* d^6 \mathbf{Z} - \frac{1}{\lambda_{Ds}^2} (\phi - \langle \bar{\phi} \rangle_{\alpha}) \right]$$

粒子種 $s$ : 電子、重水素、トリチウム、ヘリウム...

- 異なるパラメータ $\mu$ の4次元双曲型偏微分方程式が場を介して結合
- ポアソン方程式の演算子はトーラス軸について対称

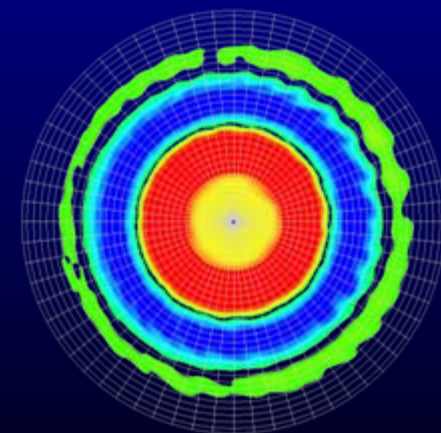
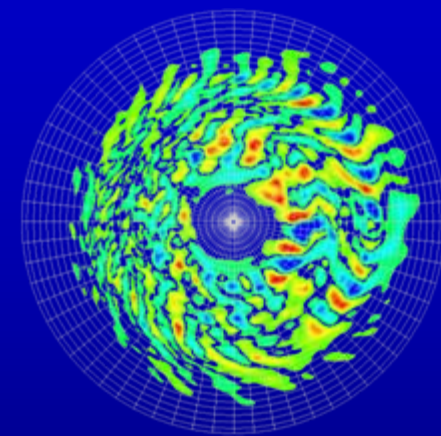
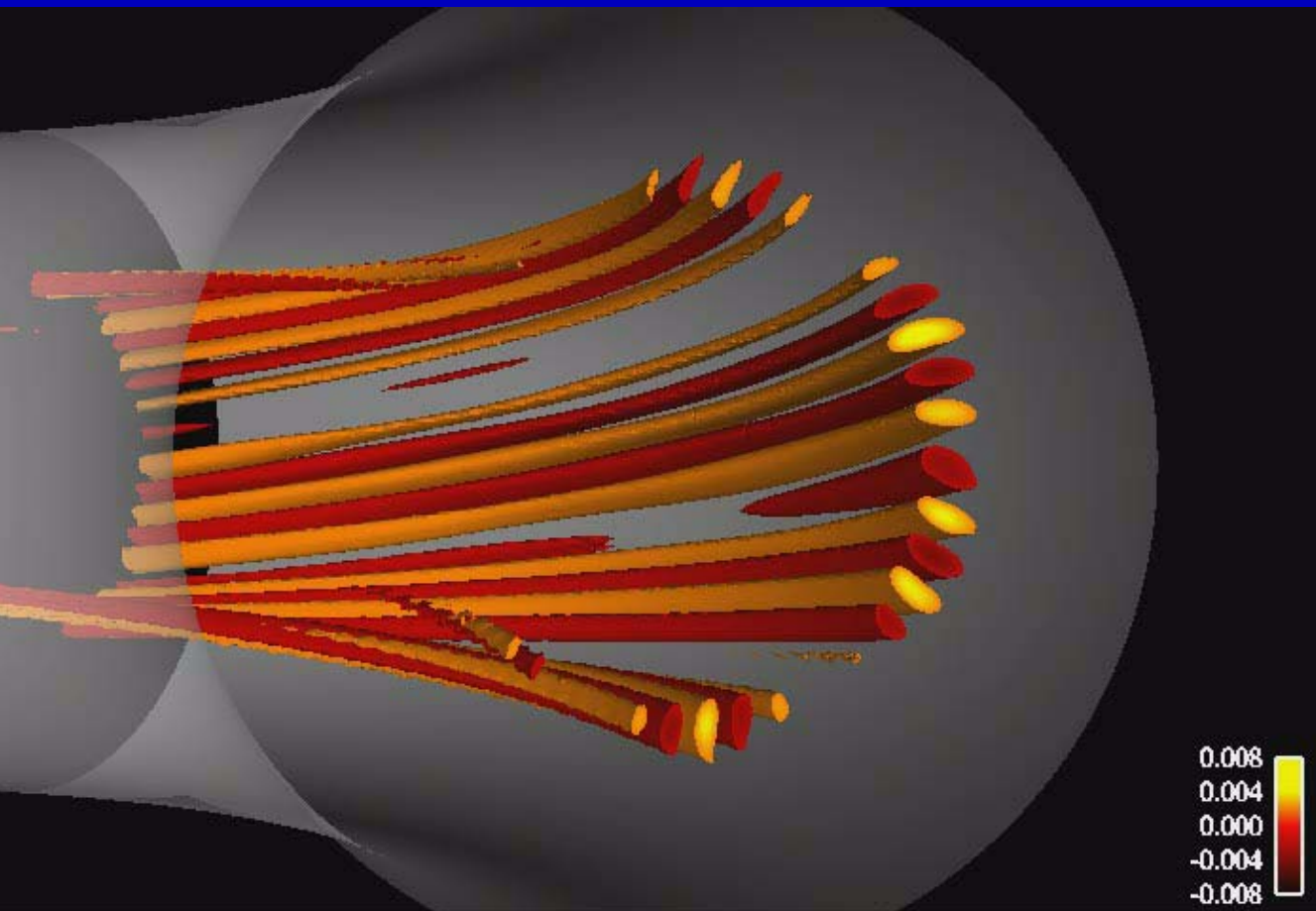
# 内容

- 1) 核融合エネルギー開発における乱流輸送研究
- 2) 核融合プラズマ乱流の第一原理モデル
- 3) 核融合プラズマ乱流シミュレーションの応用例
- 4) ペタフロップス級計算機に向けたコード開発

# イオン乱流のグローバルシミュレーション

イオン温度勾配駆動不安定性の非線形発展  
 (Altix3700Bx2/512CPU/3day, ~160M粒子, ~1ms)

乱流場の静電ポテンシャル

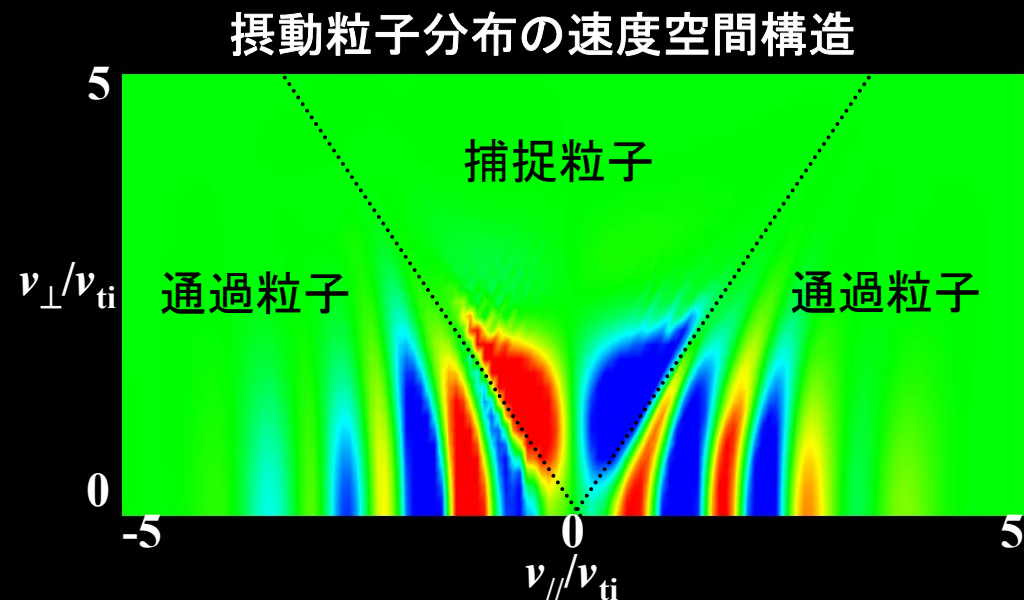
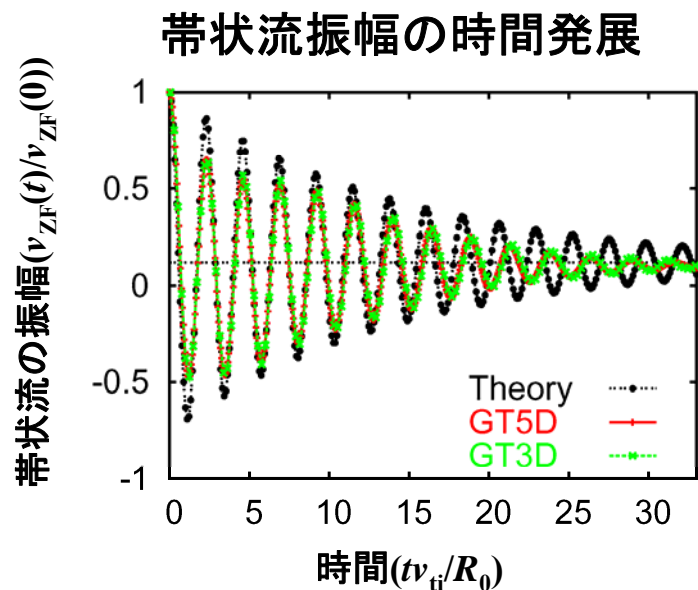


乱流場から生成される帯状流が乱流輸送を抑制する

帯状流の静電ポテンシャル

# 帯状流レベルを決める運動論的效果

- 帯状流の減衰テストシミュレーション (Idomura, EPS conf. proc.'07)

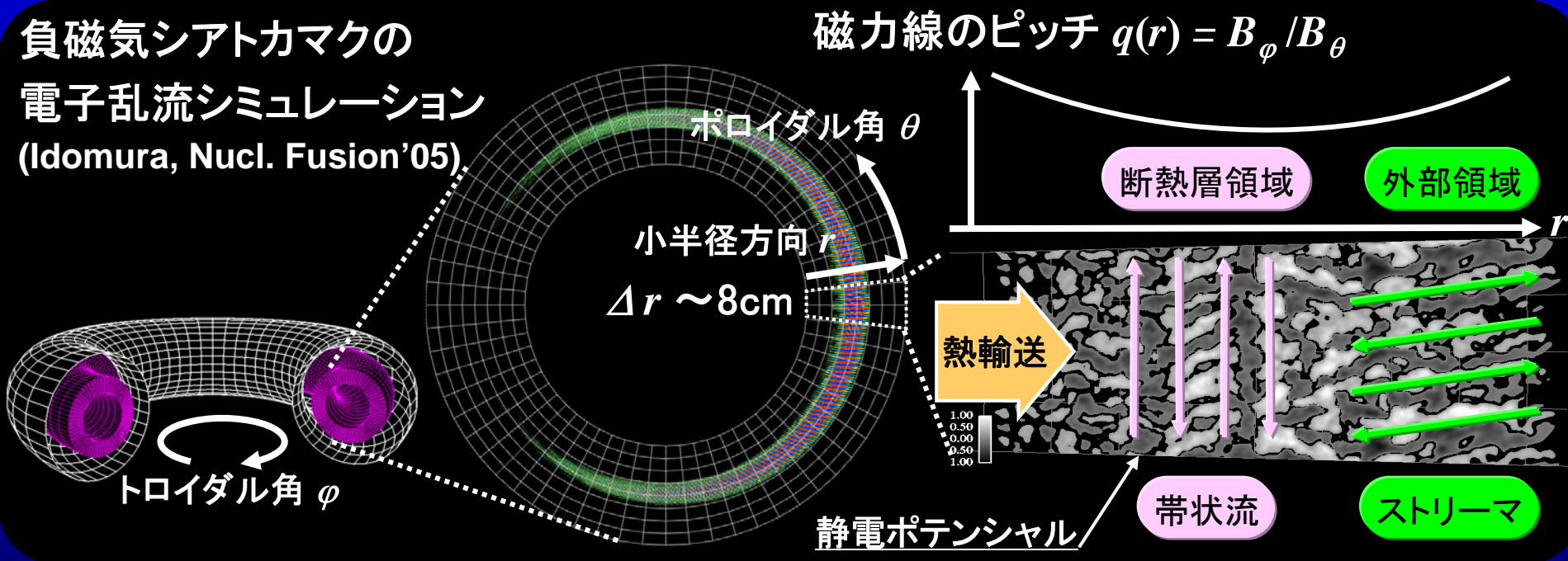


- 初期に与えた帯状流が振動しながら減衰し有限レベルに収束
- 性質の異なる粒子軌道が競合して帯状流振幅を決定する
  - 通過粒子: 波-粒子共鳴により振動帯状流を減衰させる
  - 捕捉粒子: 粒子軌道の分極効果が帯状流レベルを決める

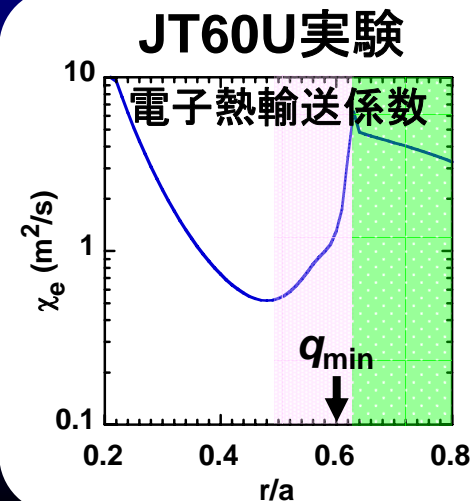


# 断熱層領域における電子乱流のシミュレーション

負磁気シアトカマクの  
電子乱流シミュレーション  
(Idomura, Nucl. Fusion'05)

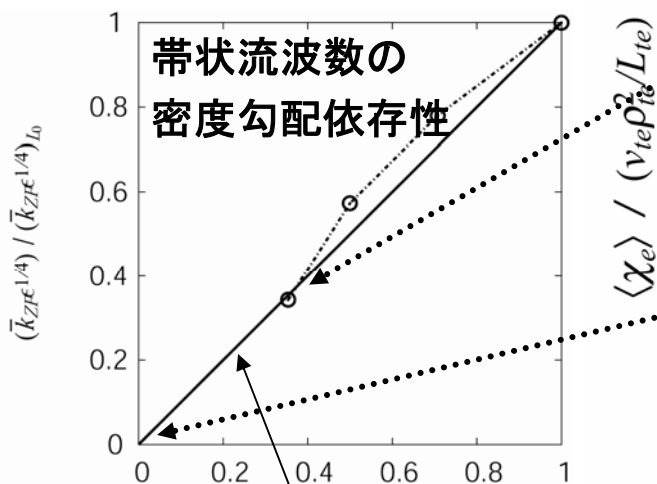


- 磁場構造により定性的に異なる乱流構造を発見
  - ✓ 断熱層領域に熱輸送を遮る帯状流構造
    - 1桁程度小さい熱輸送
  - ✓ 外部領域に等圧面を横切るストリーマ構造
    - 非常に大きい熱輸送
- JT60U実験における断熱層を定性的に説明

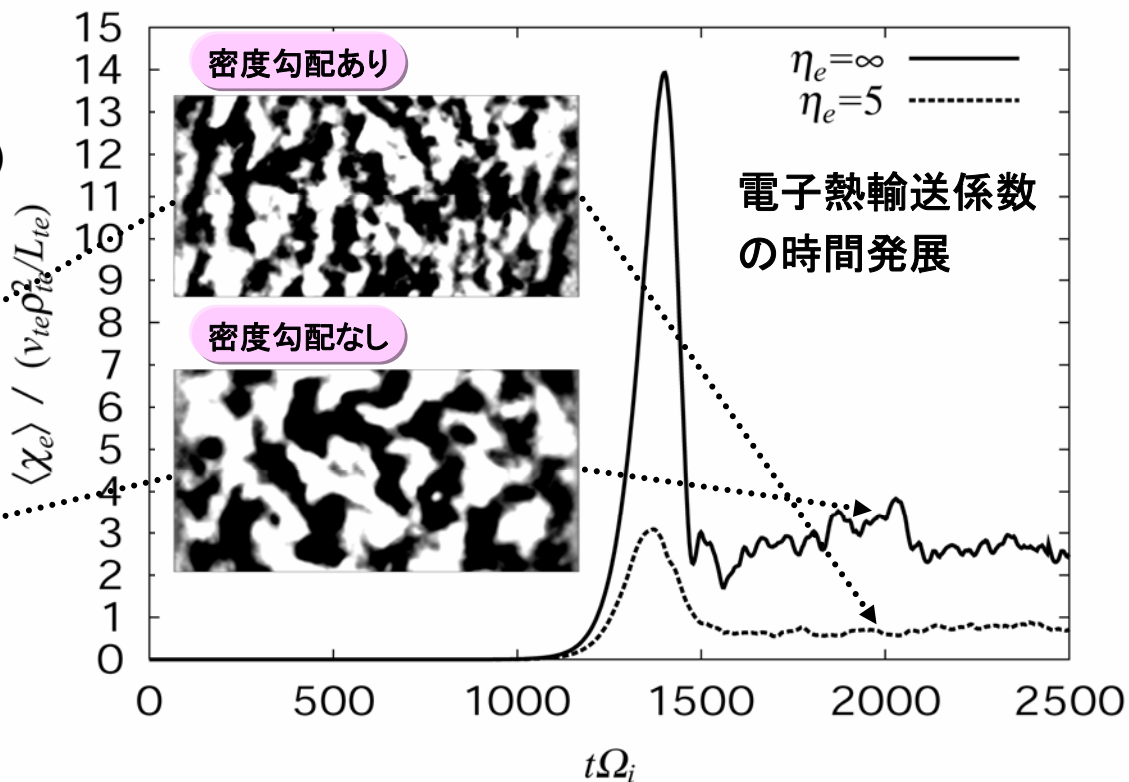


# 電子乱流における自己組織化と乱流輸送抑制

電子乱流の自己組織化  
による乱流輸送抑制  
(Idomura, Phys. Plasmas'06)



$$k_\beta \epsilon^{1/4} \propto L_n^{-1/2} \sqrt{L_0/L_n}$$



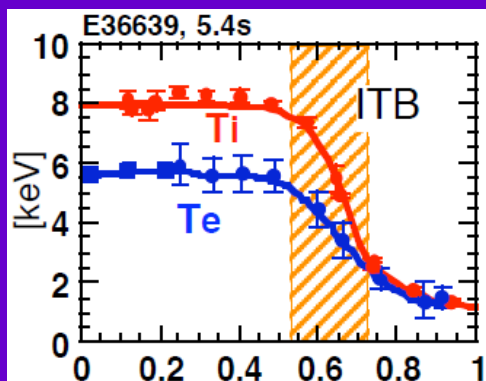
- 電子乱流における帯状流の自己組織化をシミュレーションで確認
- 帯状流波数と密度勾配のスケーリングを発見  
→密度勾配により乱流構造を制御できる可能性を示す

# 内容

- 1) 核融合エネルギー開発における乱流輸送研究
- 2) 核融合プラズマ乱流の第一原理モデル
- 3) 核融合プラズマ乱流シミュレーションの応用例
- 4) ペタフロップス級計算機に向けたコード開発

# 核融合プラズマ乱流の多階層性とシミュレーションの可能性

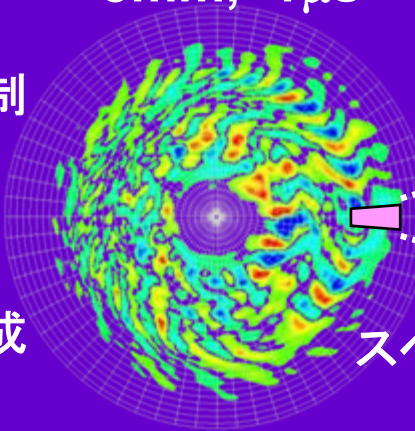
- プラズマ分布形成  
~10cm, ~10ms



乱流抑制

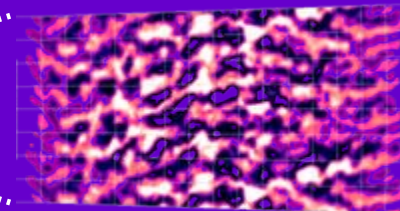
分布形成

- イオンスケール乱流  
~5mm, ~1 $\mu$ s



スペクトル相互作用

- 電子スケール乱流  
~0.1mm, ~10ns



SGI Origin/~1Tflops/1TB

イオン乱流DNS(粒子法)

電子乱流DNS(粒子法)

イオン乱流-分布形成DNS(格子法), Altix3700/13Tflops/13TB

イオン・電子乱流-分布形成フルスケールDNS(格子法), 次世代システム/~10Pflops/~PB

- 熱・粒子源を含む開放系プラズマの長時間乱流シミュレーション
- 長時間乱流シミュレーションに耐えるロバーストな高精度スキーム
- 超並列計算機を使いこなす最適化・並列化手法

# 多階層プラズマ乱流シミュレーションに向けた取り組み

## 孤立系粒子コードから開放系格子コードへの移行

### ● 孤立系粒子コード

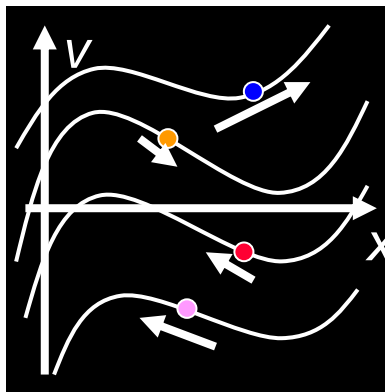
$$\frac{Df}{Dt} = 0$$

$\delta f$ 法 ( $\delta f/f_0 < 1\%$ )

~100GB

(イオン乱流DNS)

減衰乱流シミュレーション ( $t < 1\text{ms}$ )



### ● 開放系格子コード

$$\frac{Df}{Dt} = C(f) + S$$

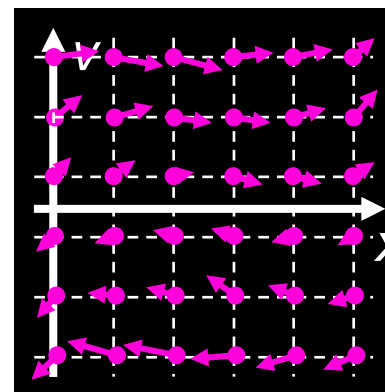
粒子衝突 熱・粒子源

CFDスキーム

1~10TB

(イオン乱流DNS)

駆動乱流シミュレーション ( $t > 1\text{ms}$ )

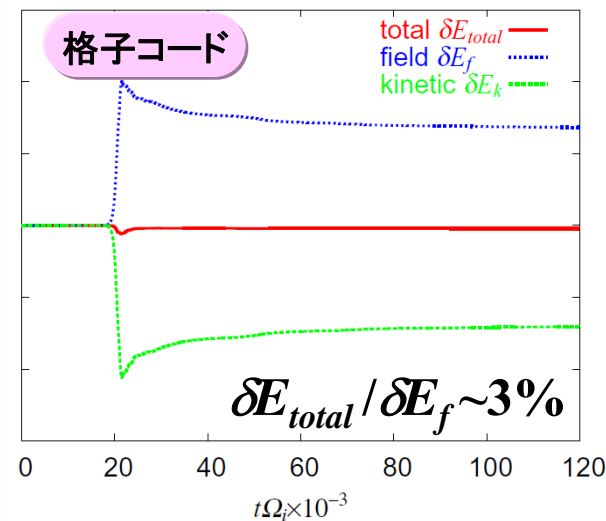
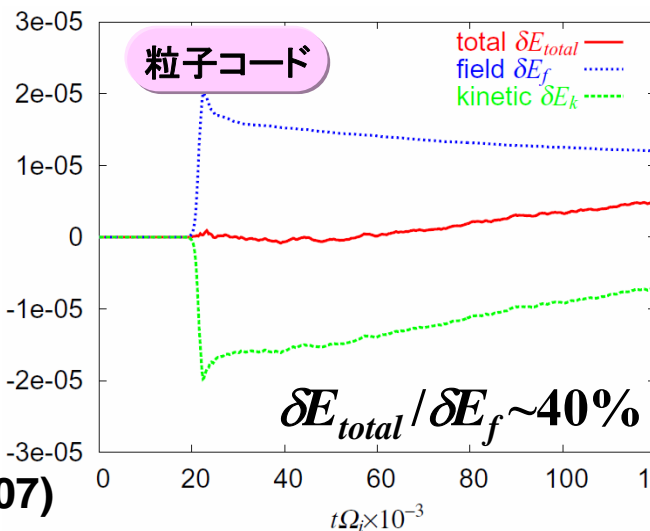


### 無散逸保存型スキーム

- L1/L2ノルムの保存  
→ 数値的安定性
- 誤差の蓄積が少ない

高精度かつロバーストな  
長時間シミュレーション!

(Idomura, J. Comput. Phys.'07)

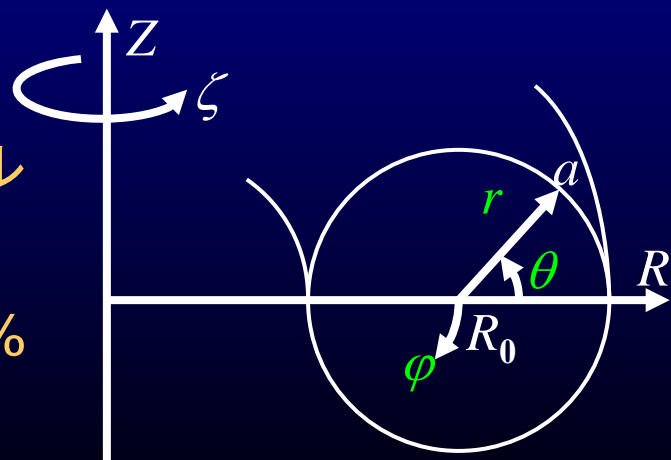
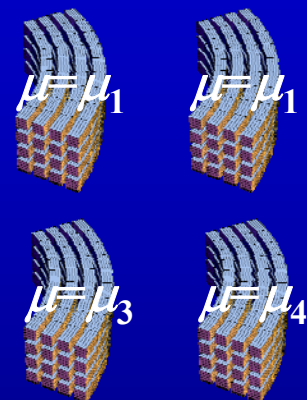




## 格子コードの計算手法

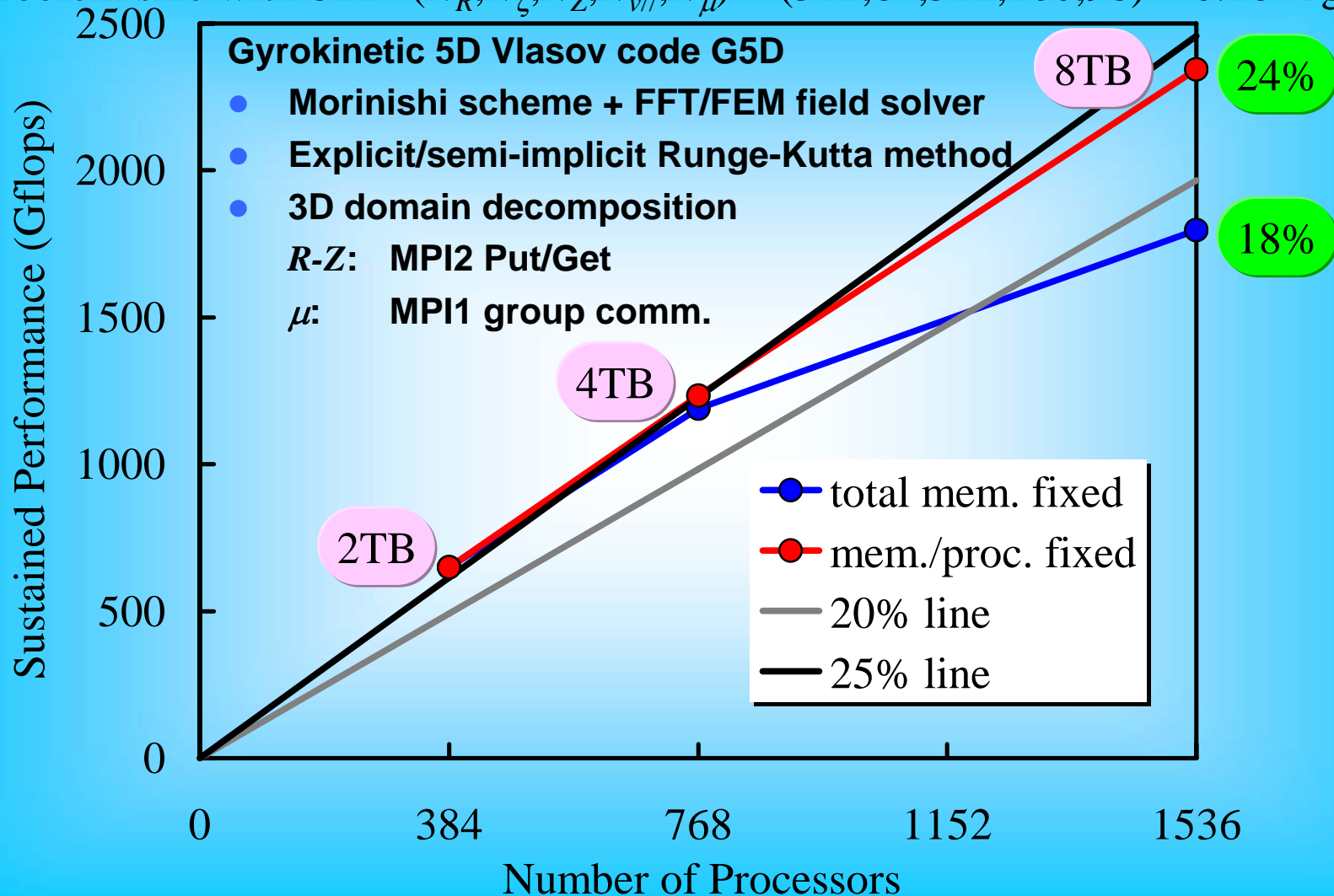
Conservative Gyrokinetic Toroidal full- $f$  5D Vlasov code GT5D

- ジャイロ運動論方程式~93%  $(R, \zeta, Z, v_{||}) + \mu$ 
  - 4次精度保存型差分スキーム(拡張型森西スキーム)
  - 2次精度半陰的ルンゲ・クッタ法(反復法)
  - 3次元領域分割: MPI2put/get( $R, Z$ )+MPI1集団通信( $\mu$ )
- ポアソン方程式~7%  $(r, \theta, \varphi)$ 
  - トロイダルモード展開+2次元有限要素法(LU分解)
  - トロイダルモード分割: MPI2put/get( $R, Z$ ) $\leftrightarrow$ ( $\varphi$ )
- 格子コードの特徴
  - 5次元空間で分割軸選択の自由度
  - 3次元並列で1000CPU以上までスケール
  - さらに高次元並列の可能性( $\zeta, v_{||}$ )
  - 実効性能: スカラ15~25%、ベクトル~50%



# Altix3700Bx2における5次元格子コード性能

Problem size with 8TB :  $(N_R, N_\zeta, N_Z, N_{v||}, N_\mu) = (512, 64, 512, 100, 98) \sim 0.164$ Tgrids





# 世界の核融合プラズマ乱流コードと計算機資源

コード名	機関	手法	モデル	計算機
GKV	NIFS	CFD	Flux tube	NEC SX7(1.4TF)/ES(40TF)
GENE	IPP	CFD	Flux tube	IBM p5(5TF)/Altix4700(62TF)
SUMMIT	U. Colorado	PIC	Flux tube	ORNL, NERSC, etc... CrayXT4/XT3(119TF) CrayX1E (18TF) IBM Seaborg SP (10TF) IBM pSeries (7.5TF)
PG3EQ	LLNL	PIC	Flux tube	
GS2	U. Maryland	CFD	Flux tube	
GTC	PPPL	PIC	Global	
GYRO	GA	CFD	Global	
ORB5	EPFL	PIC	Global	IBM BlueGene (23TF)
GYSELA	CEA	CFD	Global	Bull Novascale (64TF+39TF)
GT3D	JAEA	PIC	Global	SGI Altix3700Bx2 (13TF)
GT5D	JAEA	CFD	Global	

PIC: 粒子モデル, CFD: 格子モデル

Flux tube: 一本の磁力線に沿った局所領域の簡約化モデル

# 核融合プラズマ乱流シミュレーションの課題と展望

- 核融合プラズマ乱流シミュレーションの特徴
  - 5次元運動論モデルによるトラス全体のシミュレーションが必要
  - 主要スケールは粒子軌道と装置サイズで制限されDNSが有効
  - TF級計算機によりイオン乱流・電子乱流のDNSが可能になった
- 核融合プラズマ乱流シミュレーションによるこれまでの成果
  - 観測が難しい核融合プラズマ乱流の描像が明らかになってきた
  - 帯状流やストリーマといった多彩な自己組織化現象が発見された
  - 与えられた分布に対する定常乱流輸送係数の評価が可能になった
- 今後の核融合プラズマ乱流シミュレーションにおける課題
  - PF級計算機が長時間、フルスケールシミュレーションを可能にする
  - 多彩な乱流構造をもたらすプラズマ分布形成の起源が明らかになる
  - 分布形成、乱流遷移等を含む輸送評価や制御手法開発が可能になる

→数値トカマクへの挑戦！