

「京」を用いたマルチスケール核融合プラズマ  
乱流シミュレーション

前山 伸也  
日本原子力研究開発機構  
システム計算科学センター

# 「京」を用いたマルチスケール核融合プラズマ乱流シミュレーション

前山 伸也

日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター

〒277-0871 千葉県柏市若柴 178-4-4

[maeyama.shinya@jaea.go.jp](mailto:maeyama.shinya@jaea.go.jp)

核融合プラズマでは、プラズマ中で生じる乱流が熱や粒子の輸送を引き起こし、プラズマ閉じ込め性能を劣化させてしまうため、乱流輸送現象の解明が重要な課題である。プラズマ乱流の理解は、ジャイロ運動論と呼ばれる第一原理的モデルに基づく理論・数値シミュレーション研究により推し進められてきた。従来の多くの研究では、イオン系乱流（波長約 2cm、周波数約 10kHz）と電子系乱流（波長約 0.5cm、周波数約 400kHz）の間のスケール分離を仮定して解析がなされてきた。しかしながら、多階層の物理が非線形性により複雑に相互作用する乱流現象において、スケール分離の仮定は自明ではなく、イオン系乱流と電子系乱流の間の相互作用の有無を明らかにすることが課題となっていた。両者のスケールを同時に取り扱うには、約 10 万倍の時空間分解能が必要となるため、「京」のような最先端の超並列計算機が不可欠である。

ジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV は核融合プラズマの乱流輸送解析に用いられるコードの一つで、その解析適用範囲は物理モデルの拡張と高性能計算手法の発展とともに拡大されてきた。これまでに、軸対称プラズマにおけるイオン系乱流解析（核融合科学研究所・プラズマシミュレータ 1.4TFLOPS、2006）、非軸対称プラズマにおけるイオン系乱流解析（海洋研究開発機構・地球シミュレータ 40TFLOPS、2008）、電子効果を含むイオン系乱流解析（国際核融合エネルギー研究センター・Helios 1.2PFLOPS、2013）への適用がなされ、大型実験装置との比較研究も行われている。そして近年、10PFLOPS を誇る理化学研究所の「京」を活用することで、マルチスケール核融合プラズマ乱流シミュレーションが実現した。

「京」は数万の計算ノードが Tofu インターコネクトと呼ばれるネットワークで接続された分散並列計算機であり、その性能を最大限に引き出すためにはノード間通信コストの削減が重要となる。GKV コードではジャイロ運動論で記述される 5 次元位相空間の並列化に伴い、様々な種類の通信が発生する。そこで、これらの異なる通信パターンに対し、通信のトレードオフを分析し、Tofu インターコネクト上で通信コストが最小となる最適化技術を開発した。具体的には、5 次元空間をいくつかのセグメントに区分けして、通信を局所的に閉じ込めて実行するようにプロセス配置することで、通信コストを約 60%削減することに成功した。それに加えて、各計算ノードに搭載された複数のコアを利用して、通信スレッドと演算スレッドによる通信と演算の同時処理を行い、通信コストを実効的にマスクすることに成功した。以上の最適化により、GKV の並列処理性能は飛躍的に向上し、「京」全システム規模の約 60 万並列における 0.78PFLOPS という高い演算性能と、99.99994%という高い実効並列化率を達成した。

これにより、電子スケールからイオンスケールまでを統一的に扱う直接数値シミュレーションに基づいて、マルチスケールプラズマ乱流におけるダイナミクスを解析し、電子/イオン系乱流におけるスケール間相互作用が存在することを示した。波の非線形相互作用に関する詳細解析により、スケール間相互作用として、①イオン系乱流による電子系乱流の抑制と②電子系乱流によるイオン系乱流の増大の二つの物理機構を明らかにした。前者は、イオン系乱流の作る渦のせん断効果により、電子系乱流で現れる波が引きちぎられることで生じ、これにより電子スケールで起こる電子熱輸送が低減される。後者は、電子系乱流の作る微細な渦が、帯状流と呼ばれる空間的対称性を持つ層流状の流れに対する減衰として寄与することで生じる。イオン系乱流を抑制する効果を持つ帯状流が低減されることで、結果的にイオン系乱流が増大することが明らかとなった。これらの成果は、従来のスケール分離の仮定を覆すスケール間相互作用の存在の実証と、その物理機構を解明した成果として、高性能計算分野のみならず、核融合分野においても高く評価されている。

以上のように、「京」を活用した超並列計算は核融合プラズマ乱流研究のブレークスルーをもたらしている。今後はエクサスケール計算機への適用を視野に入れてさらに開発を進め、新たな物理を切り拓くツールとして、ますます発展していく大規模並列計算機を活用したい。

# 「京」を用いたマルチスケール 核融合プラズマ乱流シミュレーション

前山 伸也

日本原子力研究開発機構システム計算科学センター

共同研究者：渡邊智彦(名古屋大), 井戸村泰宏, 仲田資季, 矢木雅敏,  
宮戸直亮, 沼波政倫(核融合研), 石澤明宏(核融合研)

第26回CCSEワークショップ, 柏, 2015年2月26日

This work is supported by HPCI Strategic Program  
Field No.4 and MEXT KAKENHI Grant No.26800283.



## Outline

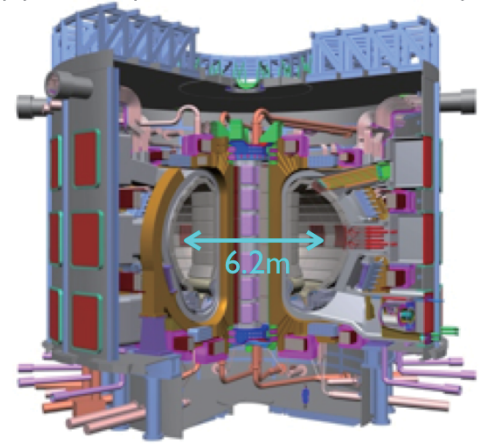
- プラズマ乱流解析コードGKV
- 「京」におけるGKVコードの超並列化
- マルチスケール核融合プラズマ乱流シミュレーション

# 核融合とプラズマ乱流

- 核融合炉は基幹エネルギーとなり得る次世代のエネルギー源。
- 入力=出力となるブレークイーブン条件を達成。エネルギー炉としての工学実証研究が国際協力の下で進行。
- 約1億度の燃料プラズマを強力な磁場で閉じ込めて核融合反応を起こす。
- プラズマ中で生じる乱流により、閉じ込め性能が左右される。

プラズマ乱流による熱輸送特性の解明と定量的評価が核融合研究の課題。

(a) ITER(フランス:ITER機構)



(b) JT-60SA(日本:原子力機構)

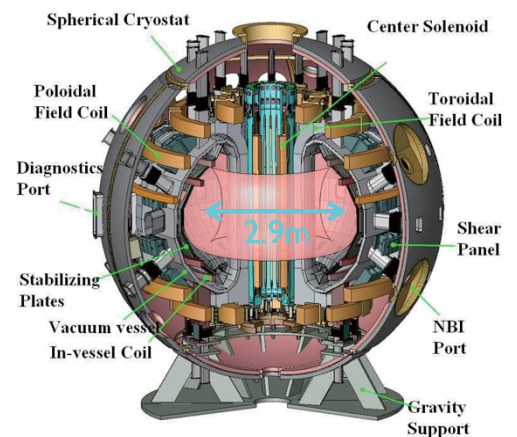
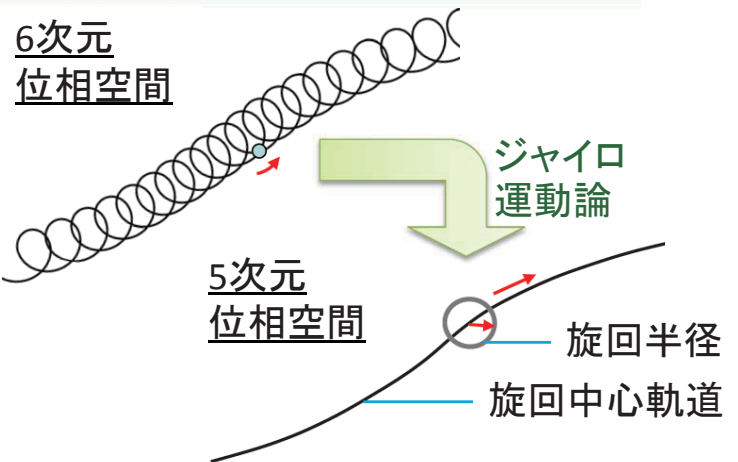


図1:建設中の核融合実験炉

## GKV: GyroKinetic Vlasov code

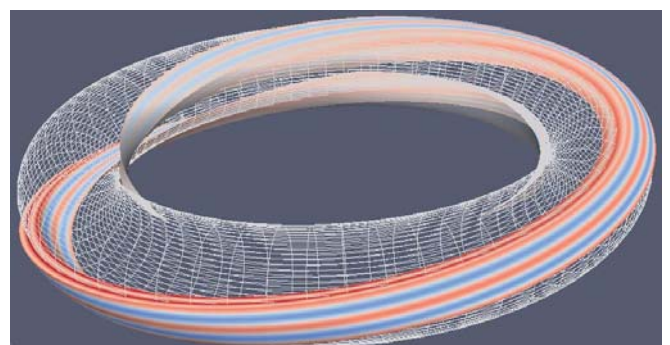
### ジャイロ運動論

- プラズマ乱流を記述する第一原理的方程式。
- 位置・速度の5次元空間におけるプラズマ挙動を表す。
- 数値計算上は**5次元CFD**。



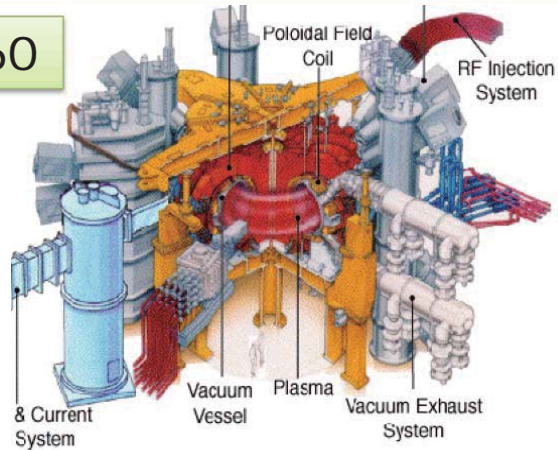
### ジャイロ運動論コードGKV

- 磁力線に沿う非直交曲線座標。
- 差分法/スペクトル法+陽的時間積分。
- 5次元空間、粒子種に関してMPI/OpenMP並列。

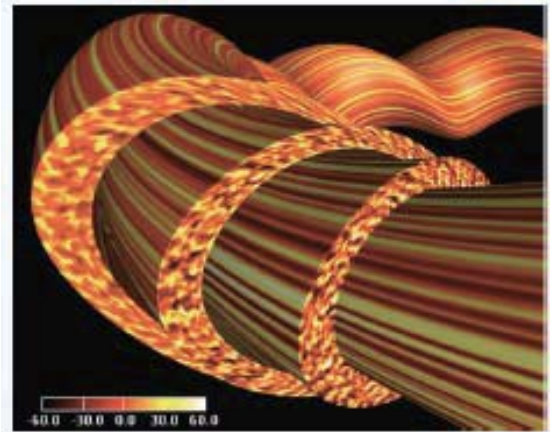
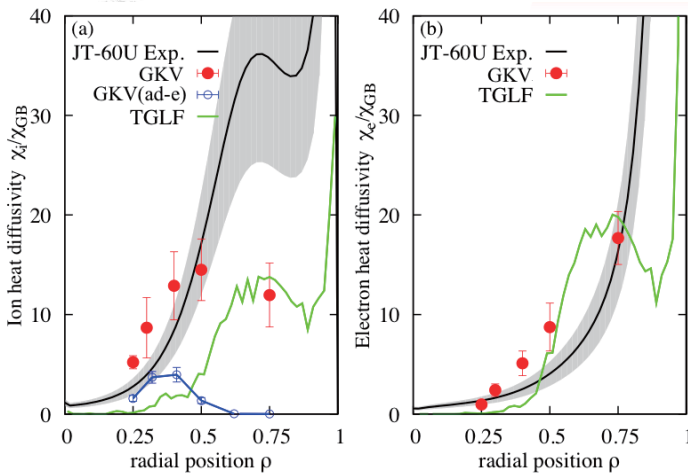
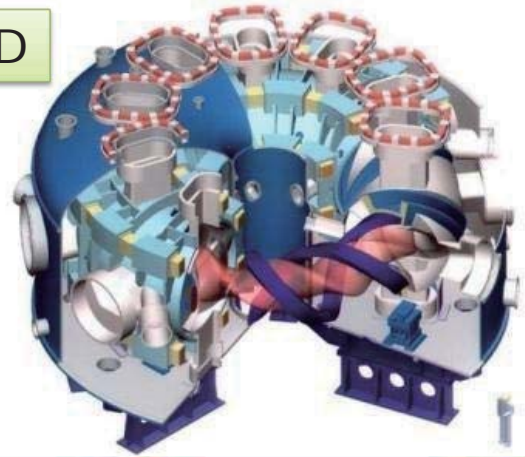


# 解析例： 大型実験との比較検証

JT-60



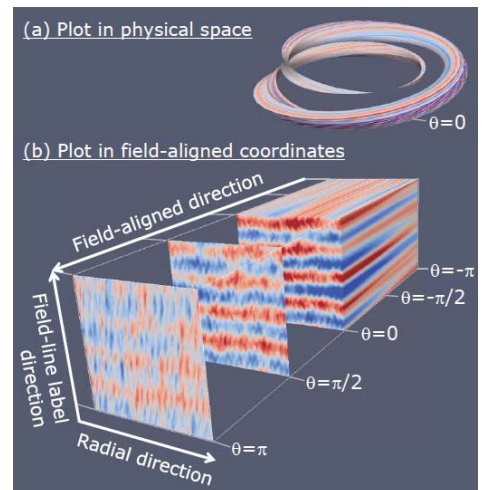
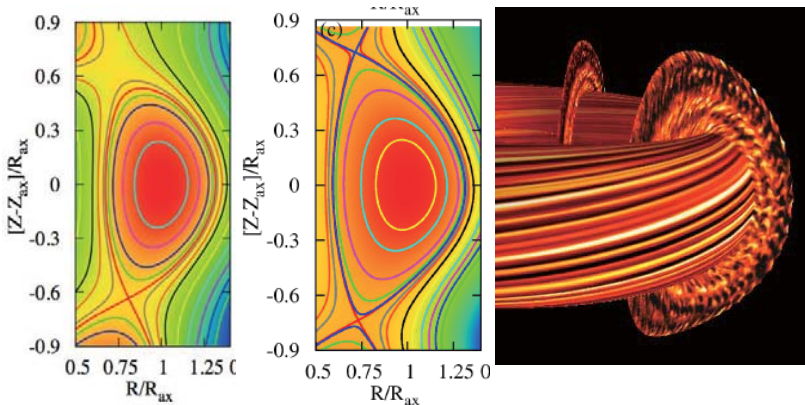
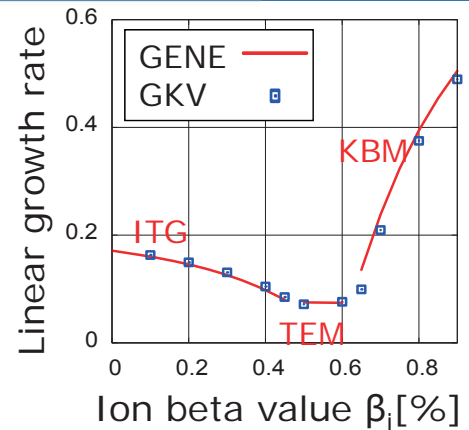
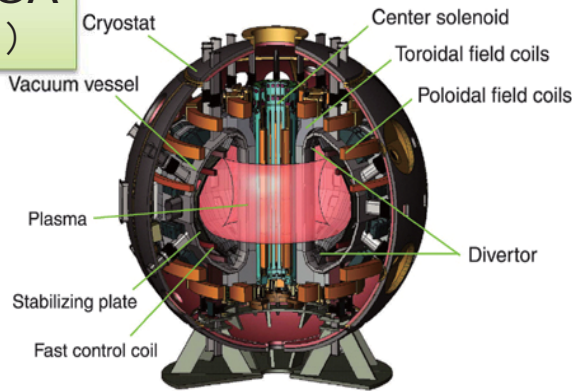
LHD



5

# 解析例： 将来装置の性能予測

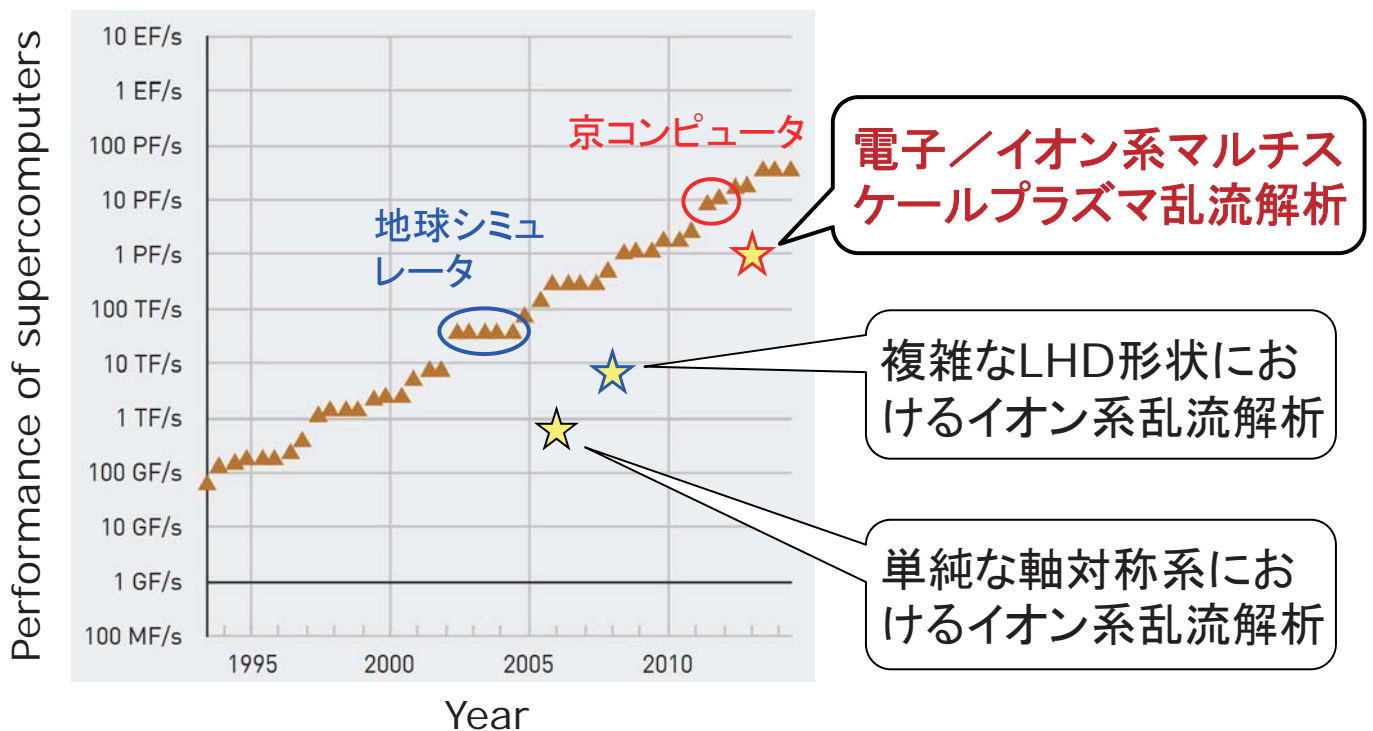
JT-60SA  
(建設中)



6

# GKVコードと高性能計算

GKVコードの適用できる物理は高性能計算の発展とともに拡大。



7

## Outline

- プラズマ乱流解析コードGKV
- 「京」におけるGKVコードの超並列化
- マルチスケール核融合プラズマ乱流シミュレーション

8

# GKVコードの並列計算構造

- 5次元空間( $x, y, z, v, \mu$ )の粒子分布関数と電磁場の発展を解く。
- 多次元領域分割[ $x$  (または  $y$ ),  $z, v, \mu$ ] + 粒子種( $s$ )並列
- MPIとOpenMPを用いたハイブリッド並列

## 多次元数値流体力学コード

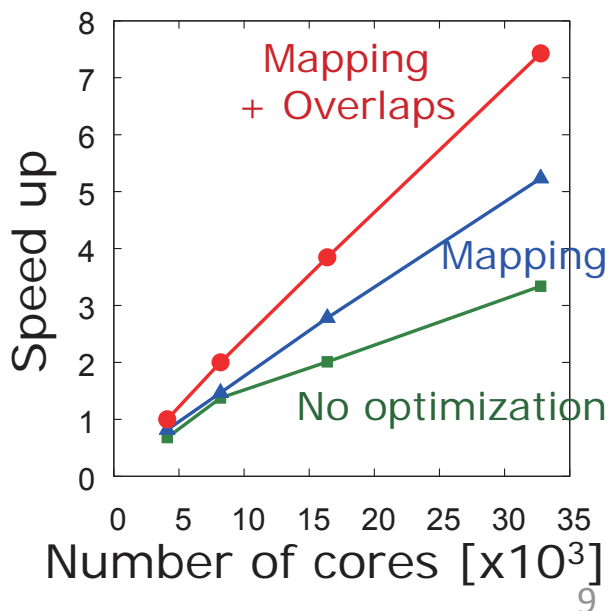
- フーリエスペクトル法( $x, y$ )
  - ↔  $x, y$ に関する転置通信
- 差分法( $z, v, \mu$ )
  - ↔  $z, v, \mu$ に関する1対1通信
- 電磁場ソルバー
  - ↔  $v, \mu, s$ に関する総和通信

## ➤ MPIプロセス配置の最適化

→ 通信コストの削減

## ➤ 通信と演算の同時処理

→ 通信コストをマスク



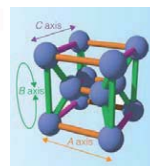
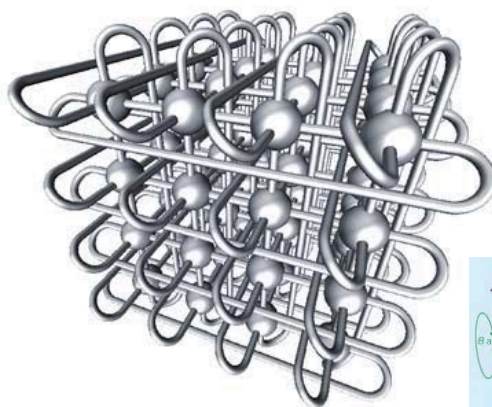
# 京コンピュータ

<http://www.aics.riken.jp/en/kcomputer/>



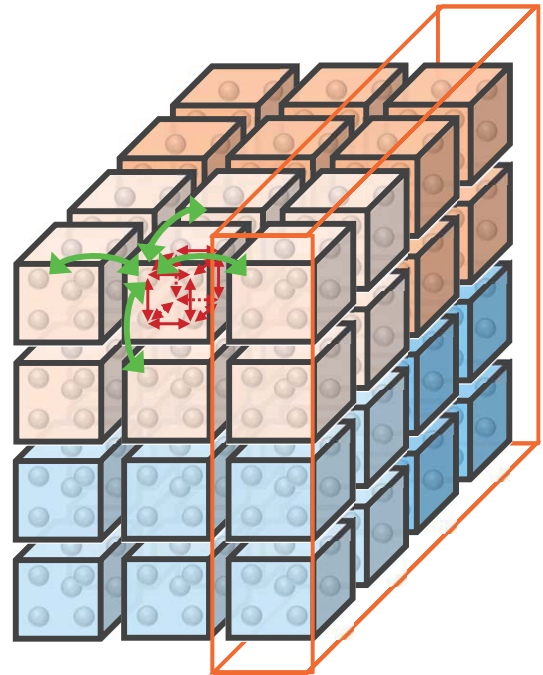
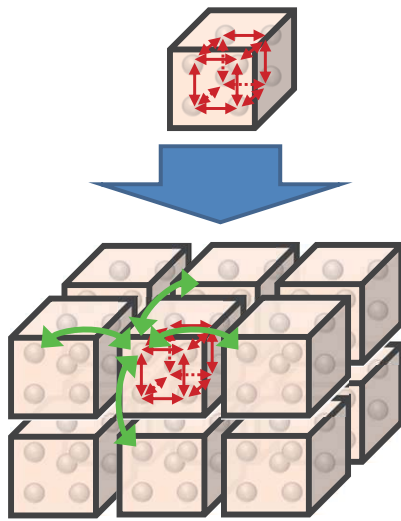
- ピーク演算性能 10.51 PFlops
- CPU: SPARC64 VIIIifx 2 GHz
  - 8 コア/プロセッサ
  - 16 GFlops/コア
  - メモリバンド幅 8 GB/s/コア
- 88128計算ノード (705024コア)
- インターコネク: Torus fusion (Tofu)
  - 6次元メッシュ/トーラス トポロジー
  - リンクバンド幅 5 GB/s × 4
  - 同時通信可能 (4送信+4受信)

## Tofuインターコネク [Ajima, 2012]



# MPIプロセス配置の最適化

①  $x, y$ に関する転置通信は1つのセグメント内で行う。



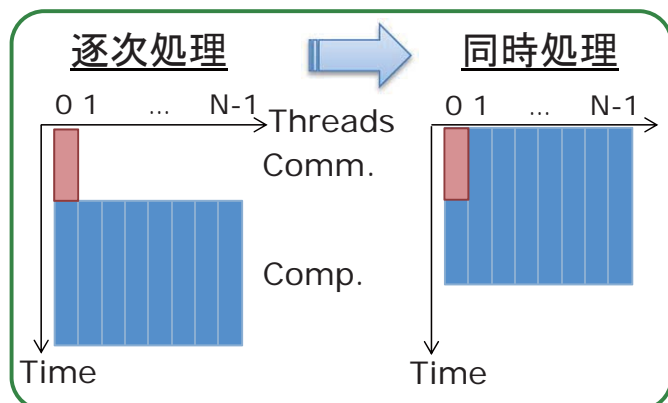
②  $z, v, \mu$ に関する1対1通信は隣接するセグメント間で行う。

③  $v, \mu, s$ に関する総和通信は1平面内で行う。

# 通信と演算の同時処理

OpenMPスレッドを用いたMPI通信と演算のオーバーラップ

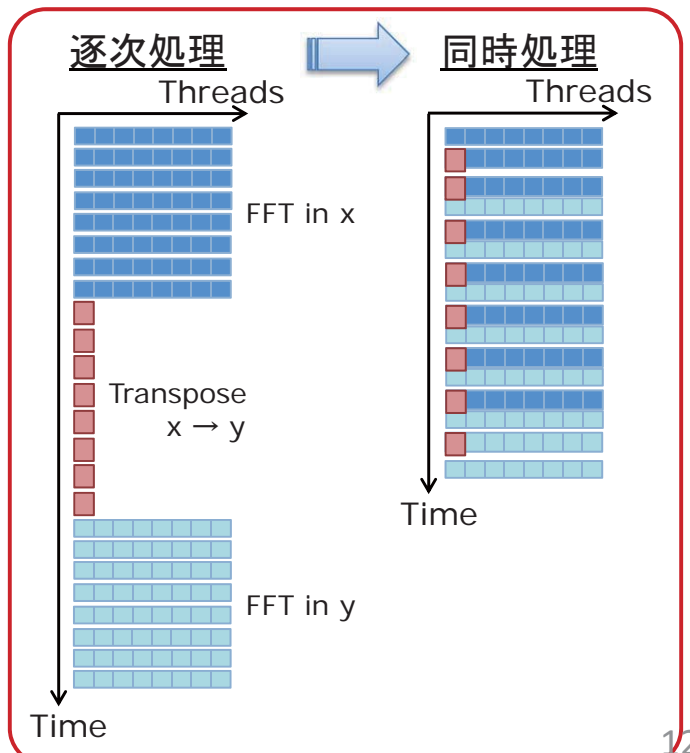
[Idomura, 2013]



- OpenMPスレッドの一つを通信に利用することで同期/非同期通信ともに同時処理可能。
- コード全体を通じた総合的なオーバーラップを実装することで効率を向上。

FFT計算におけるパイプライン化オーバーラップ

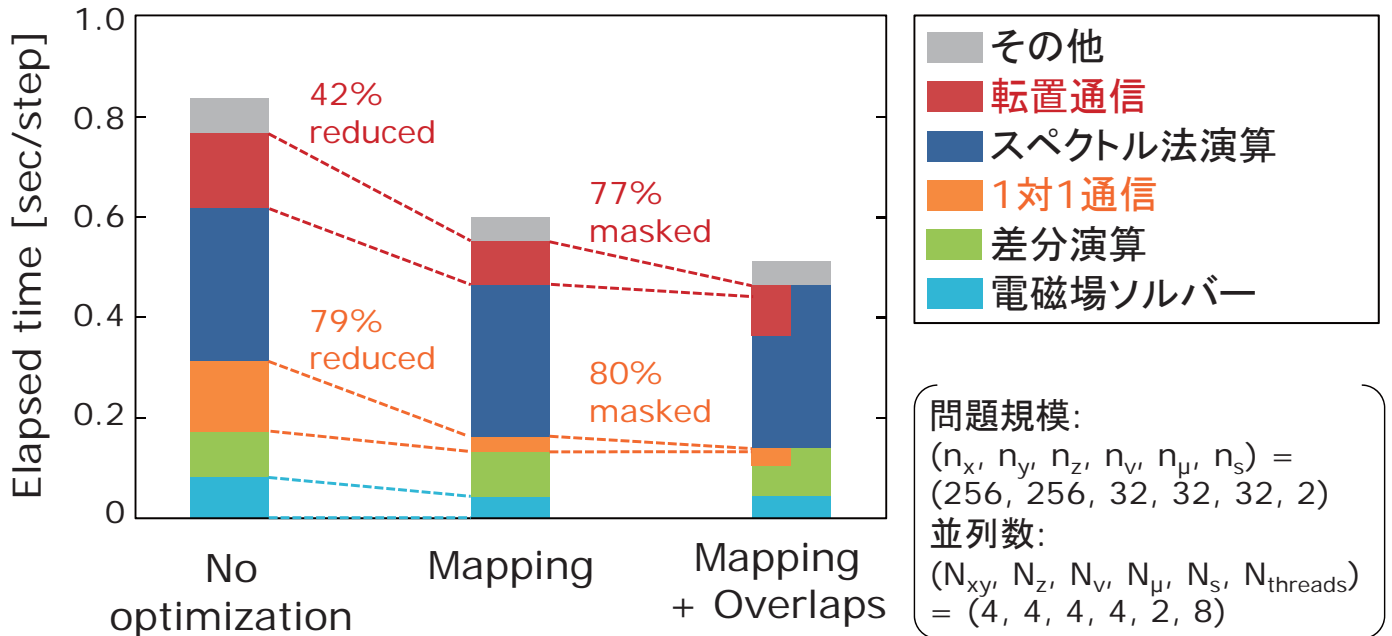
[Maeyama, 2013]



# 最適化による通信コスト削減

- MPIプロセス配置の最適化により通信コストを大幅に削減。
- 通信と演算の同時処理により通信コストを実効的にマスク。

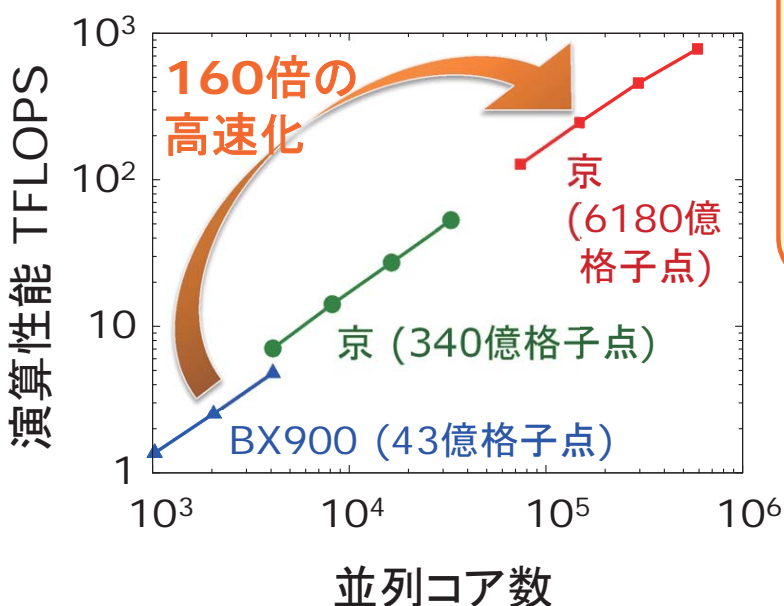
## 1ステップ当たり経過時間の推移



13

# 100万コア級の超並列化

## BX900(原子力機構)および京(理研)におけるGKVのストロングスケーリング



- 京フルノード規模にわたる60万コアまでの良好なストロングスケーリング
- 高い実効並列化率  
~99.99994%
- 演算性能780TFLOPS  
(理論ピーク比8.3~10.8%)

→ コードの高並列化・高速化により、マルチスケール乱流シミュレーションが可能となった。

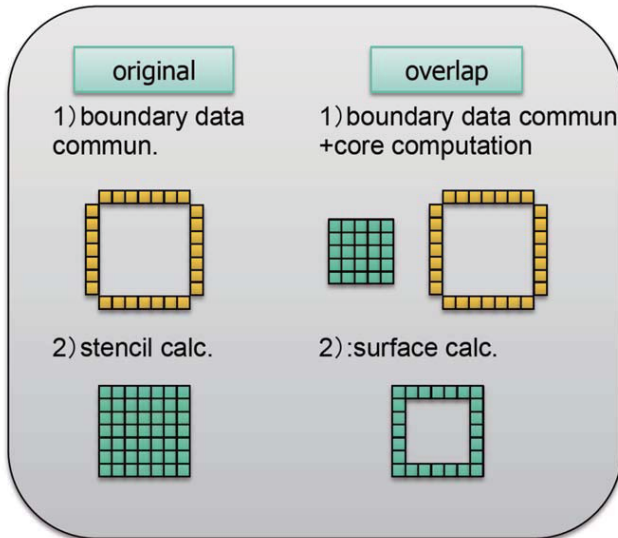
14

# 開発技術の汎用性

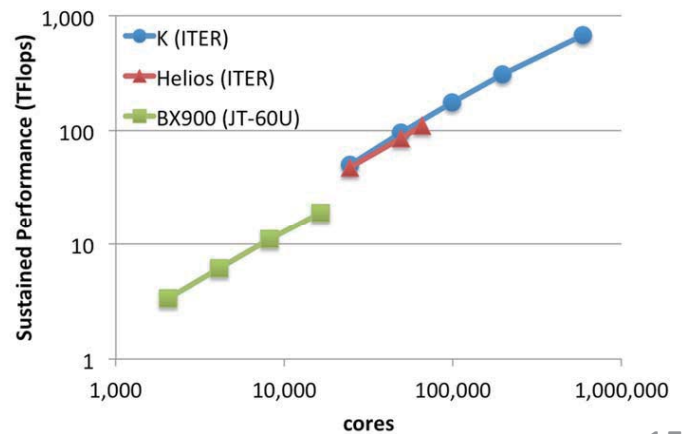
## 事例: 差分法流体解析コードGT5D

- 空間: 4次精度差分法、時間: 陰解法
- 演算カーネルは共役残差法による差分陰解法ソルバー
- 通信スレッドによる袖通信隠蔽を適用し、京フルノード規模までの良好なスケーラビリティを実現。

→ 開発技術は大規模流体解析に適用可能な汎用技術。



## GT5Dコードのスケーリング



15

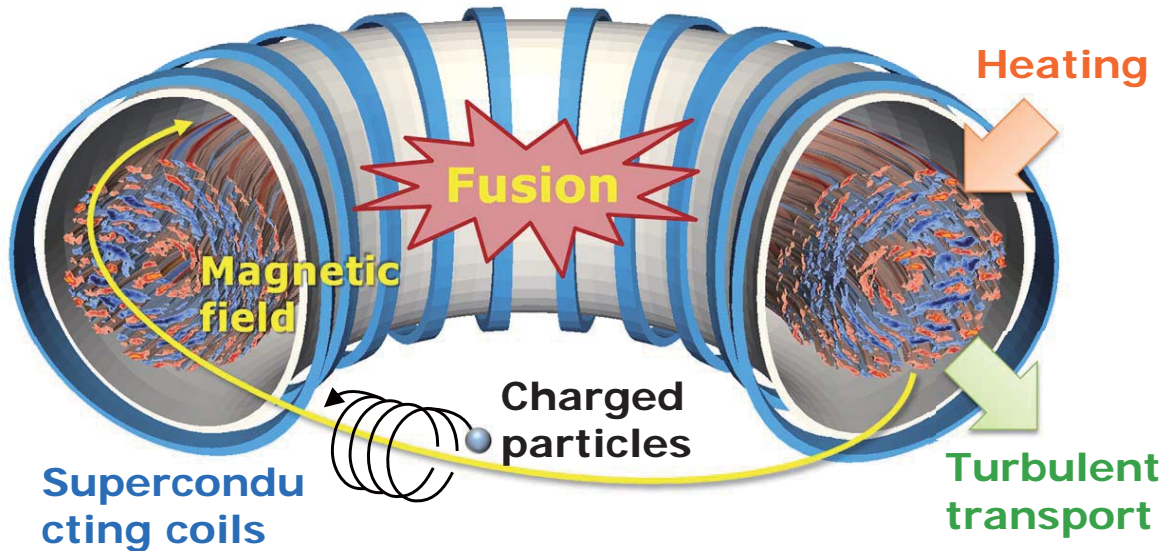
## Outline

- プラズマ乱流解析コードGKV
- 「京」におけるGKVコードの超並列化
- マルチスケール核融合プラズマ乱流シミュレーション

16

# 核融合プラズマ

- 高温のプラズマを円環状の強力な磁場で閉じ込める。
- **プラズマ乱流**が熱や粒子の輸送を引き起こし、閉じ込め性能を劣化させてしまう。



17

## 微視的不安定性とプラズマ乱流

プラズマ乱流は温度・密度勾配に起因する微視的不安定性によって駆動される。

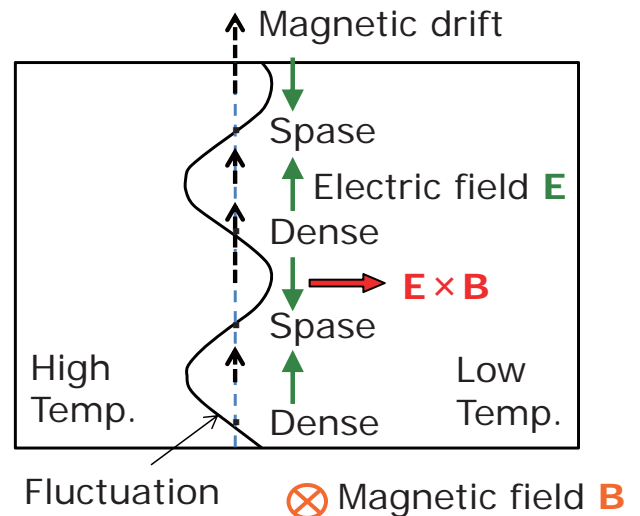
2つの典型的なスケール:

- **電子系乱流** (波長~0.5cm, 周波数~400kHz)
- **イオン系乱流** (波長~2cm, 周波数~10kHz)

スケール分離は成立するか?

→ **直接数値シミュレーション (DNS)**により検証。

電子温度勾配不安定性 (ETG) とイオン温度勾配不安定性 (ITG)



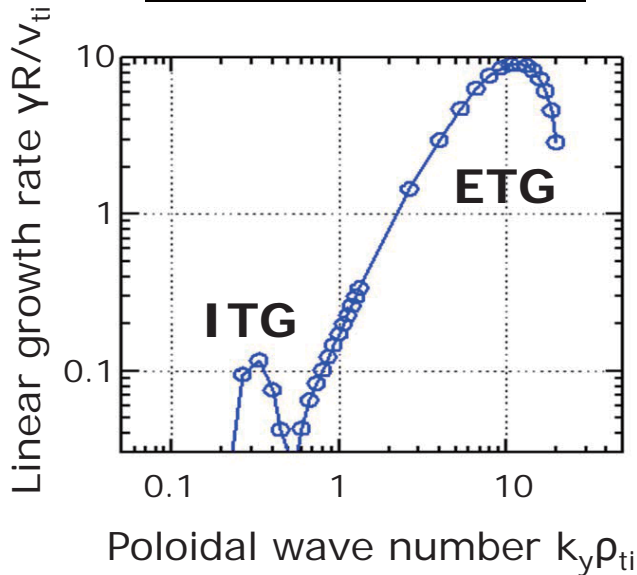
18

# 微視的不安定性の線形解析

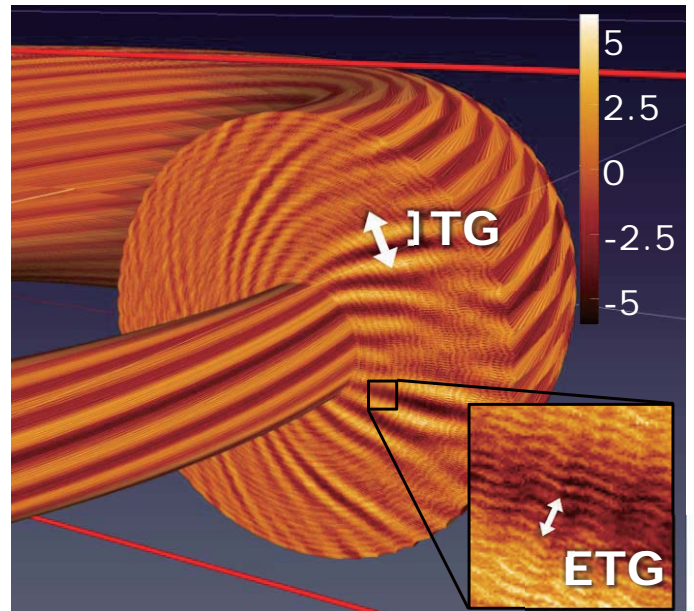
最適化されたGKVコードによりマルチスケール乱流解析が実現。

- 電子スケールからイオンスケールに渡る不安定性。

線形成長率スペクトル



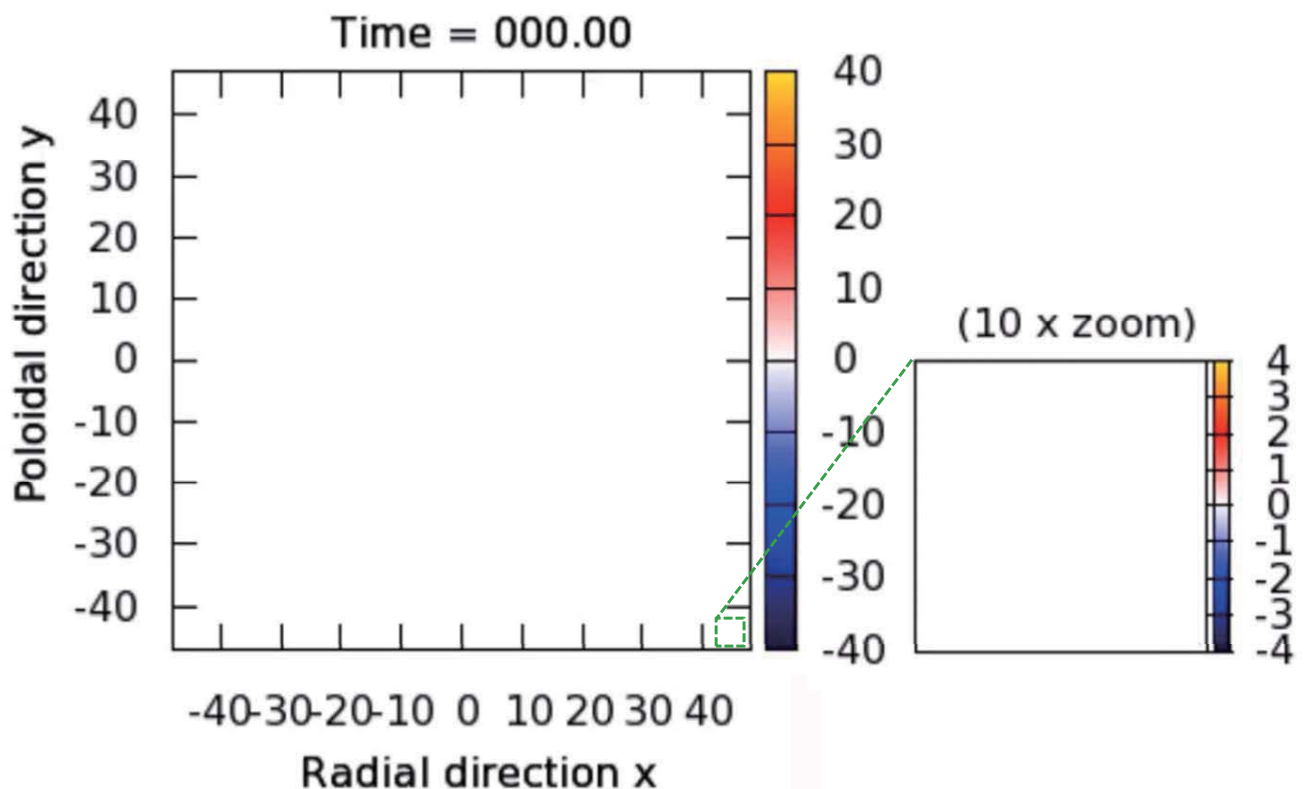
静電ポテンシャル揺動のスナップショット



19

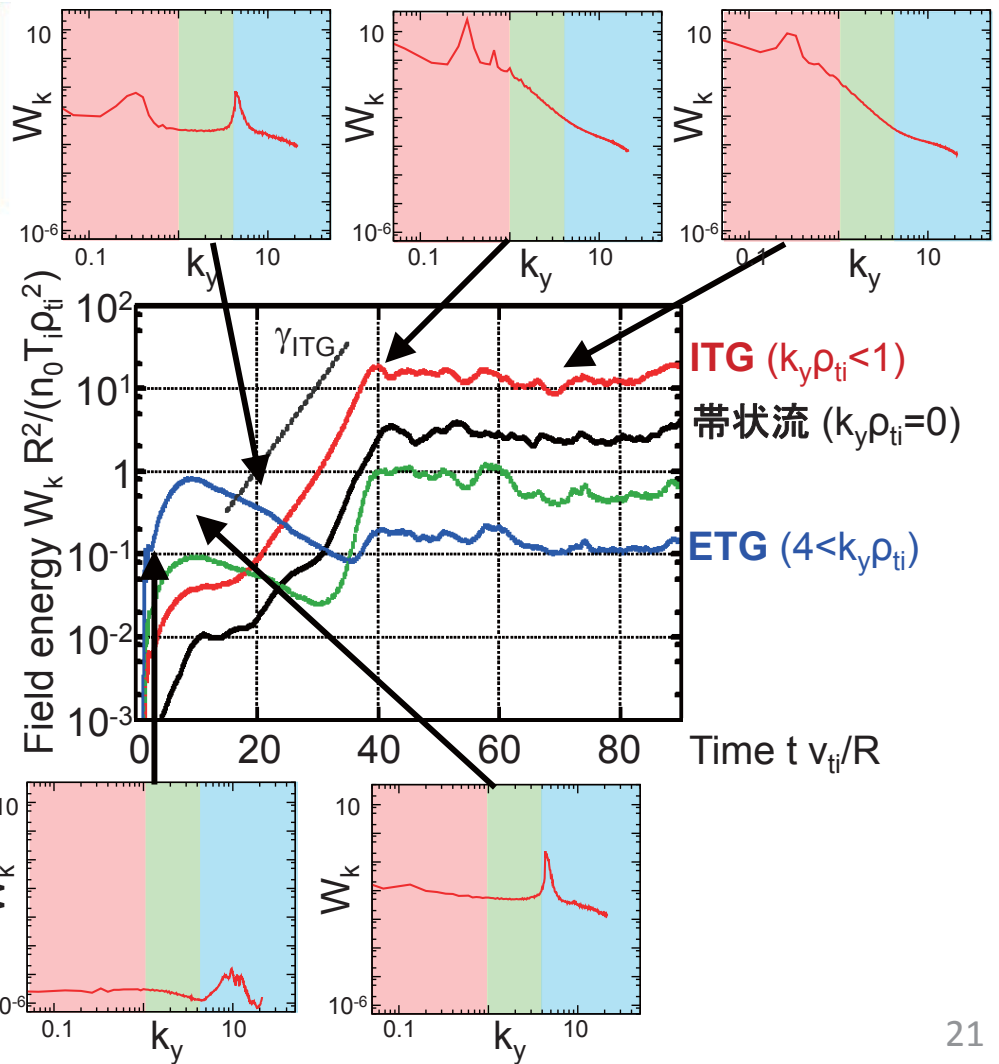
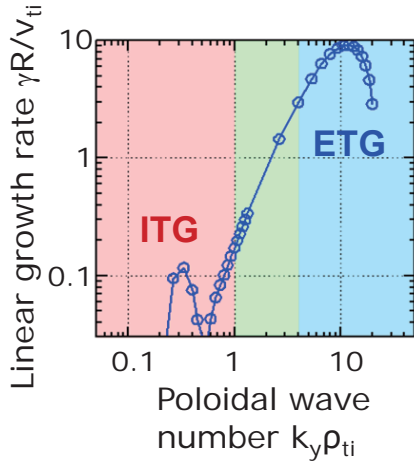
# マルチスケール乱流シミュレーション

静電ポテンシャル揺動の時間発展 (ポロイダル断面図)



20

# エネルギー スペクトル

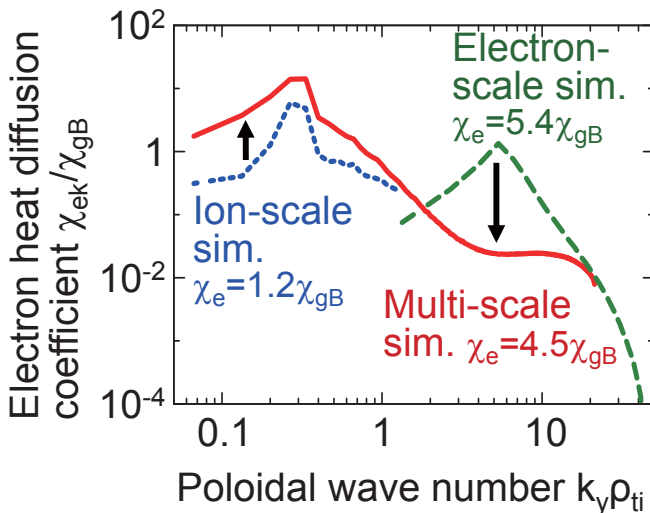


21

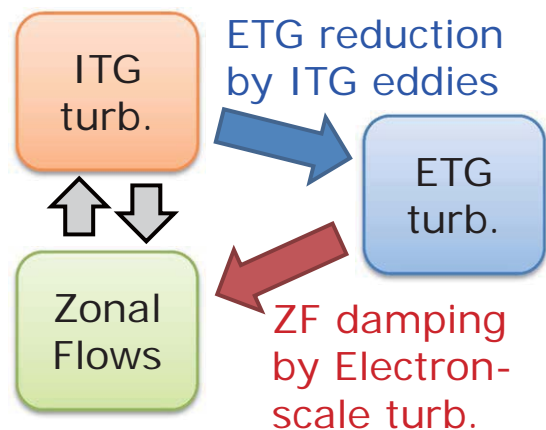
## スケール間相互作用による乱流スペクトルの変化

- イオン系乱流渦のせん断力による電子系乱流の抑制。
  - 電子系乱流の帯状流減衰効果によるイオン系乱流の増大。
- 従来のスケール分離の仮定を覆す画期的成果。

### 電子熱輸送スペクトル



### マルチスケール乱流におけるスケール間相互作用



22

## まとめ

「京」におけるGKVコードの最適化を実施し、60万コアまでの良好なスケーラビリティと99.99994%という高い実効並列化率を達成。

- 3次元トーラスネットワークにおけるプロセス配置最適化により、通信コストを大幅に削減。
- 通信と演算の同時処理により通信コストを隠蔽。

電子スケールからイオンスケールまでのマルチスケールプラズマ乱流について、直接数値シミュレーションに基づく解析を実現。

- マルチスケール乱流スペクトルは単一スケールの単純な足し合わせではない。
  - イオン系乱流渦による電子系乱流のせん断。
  - 電子系乱流の帯状流せん断効果によるイオン系乱流の増大。
- 両スケール間の相互作用の存在を実証し、その物理機構を解明。

23

## まとめ

本研究とその関連成果は、核融合・計算科学の両分野で高く評価。

- ✓ PLASMA2014 若手優秀発表賞(2014年11月)。
- ✓ HPCI利用課題優秀成果賞(2014年10月)。
- ✓ JAEA理事長表彰・研究開発功績賞(2014年10月)。
- ✓ 核融合エネルギー連合講演会若手優秀発表賞(2014年6月)。
- ✓ SC13 Best Poster Award(2013年11月)。
- ✓ JSST2013 Outstanding Presentation Award(2013年9月)。
- ✓ JSST2013 Research Award(2013年9月)。
- ✓ JSST2012 Outstanding Presentation Award(2012年9月)。

今後の課題: ポスト「京」

- エクサフロップス計算機 ~ 2020年
- メニーコア環境における最適化
- より包括的なマルチスケール核融合シミュレーション  
(電磁流体力学 – イオン系乱流 – 電子系乱流)

24