



LHDにおける周辺プラズマおよび PWIシミュレーション研究

河村学思

核融合科学研究所

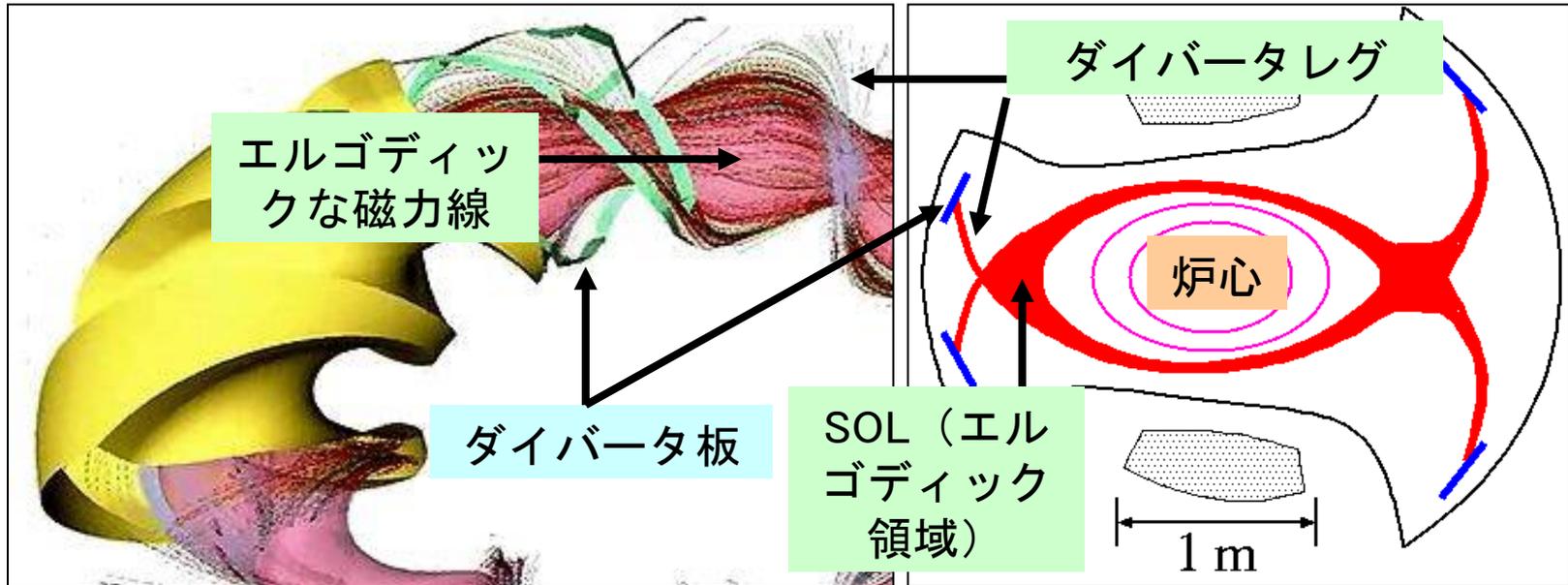
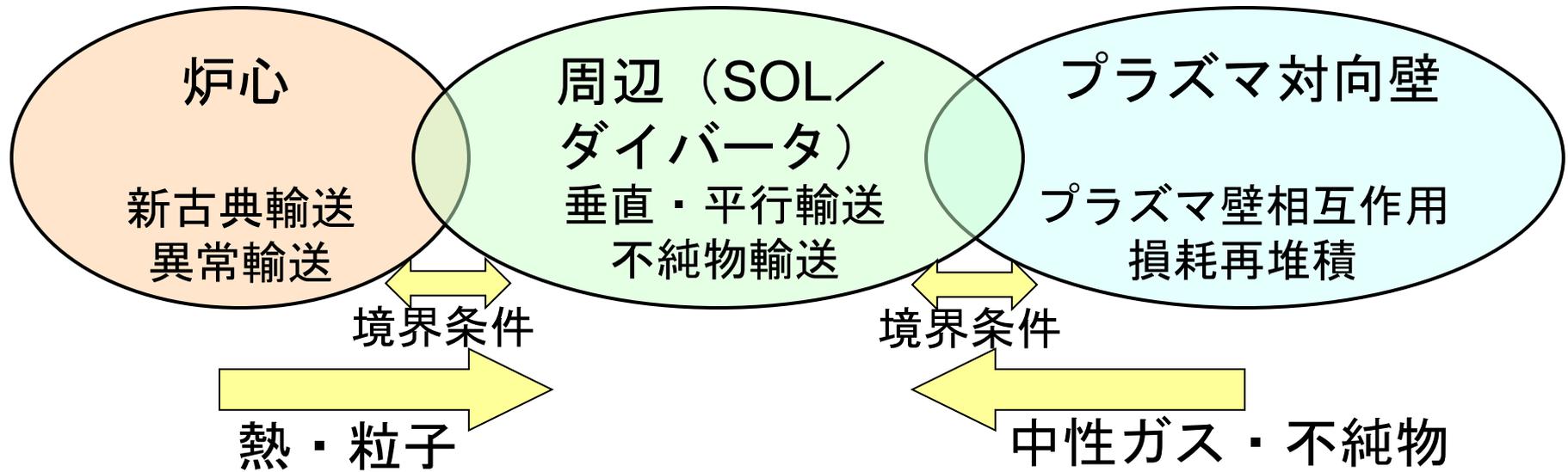
《 周辺プラズマ輸送研究グループ 》

河村学思、富田幸博、菅野龍太郎、中島徳嘉、森崎友宏、増崎貴、小林政弘、庄司主、時谷政行、村上泉、加藤太治、他（核融合科学研究所）

A. Kirschner (Forschungszentrum Jülich)

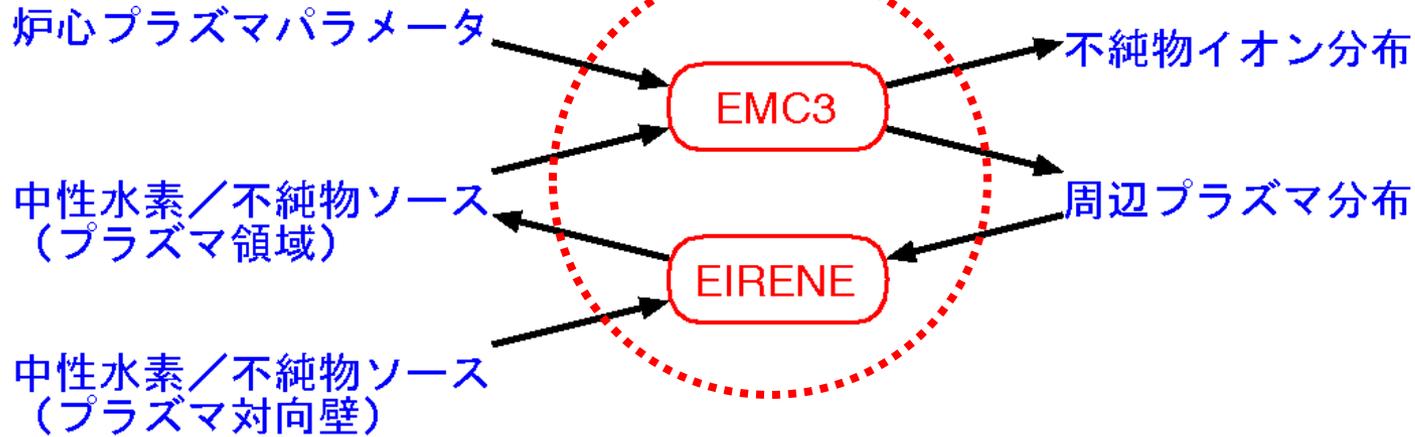
Y. Feng (Max-Planck-Institut Greifswald)

“周辺シミュレーション” の位置づけ





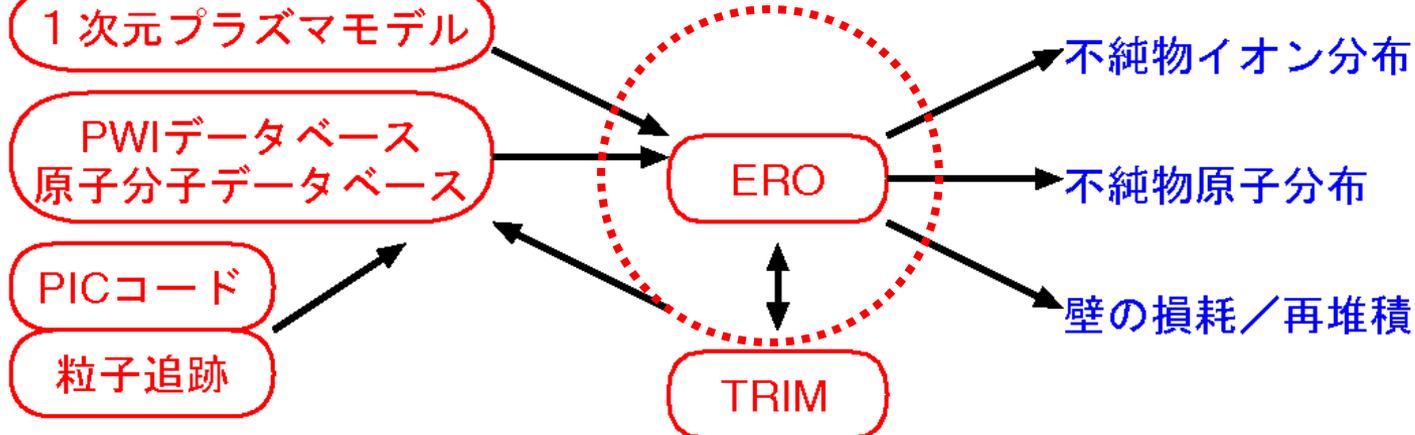
周辺輸送コードの相互関係



プラズマ計算
グローバル
(流体)



連携へ



PWI計算
ローカル
(粒子)



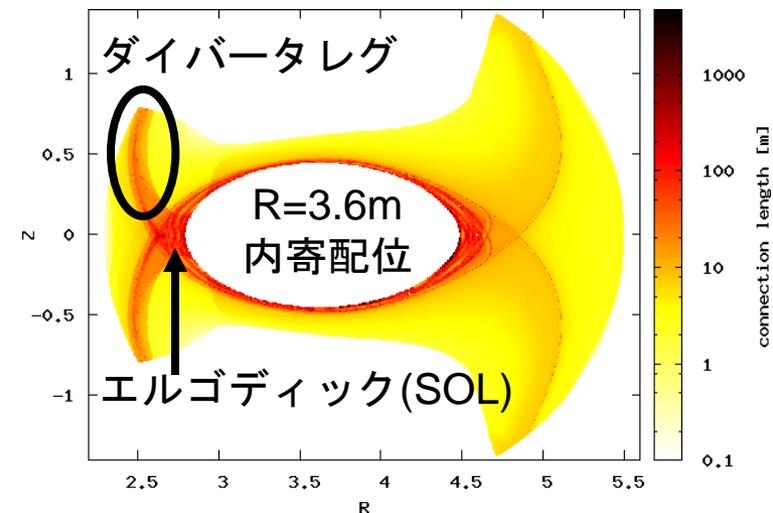
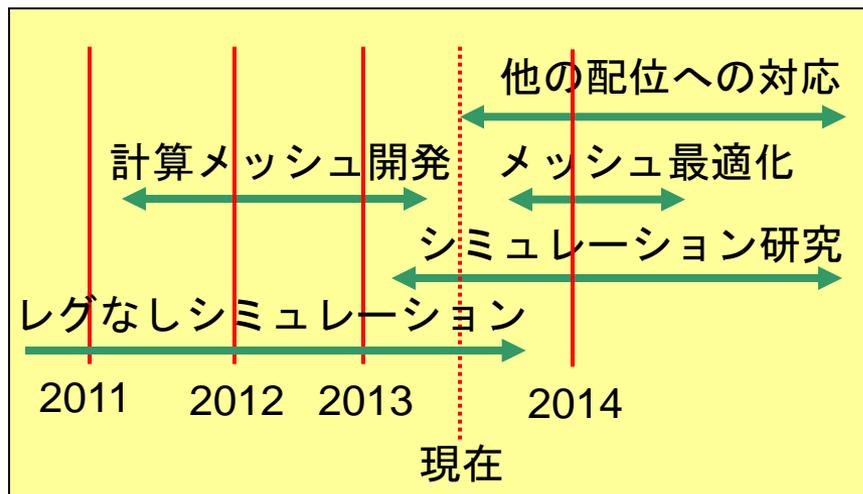
拡張版EMC3-EIRENEコード開発

◆ 開発目標

- LHDのダイバータレグを含めた周辺プラズマ輸送コード
- 三次元磁場構造がもたらす輸送の理解と実験解析への応用
- LHD唯一の3次元周辺プラズマコードとして共同研究を推進

◆ 開発状況

- Max-Planck研究所(Dr. Feng)からEMC3-EIRENEコードを導入
- LHDダイバータレグとエルゴディック領域(SOL)を一体として解く計算メッシュの開発が実用可能な段階に達した
- 閉構造でのシミュレーション研究を開始



図：接続長分布（対数）



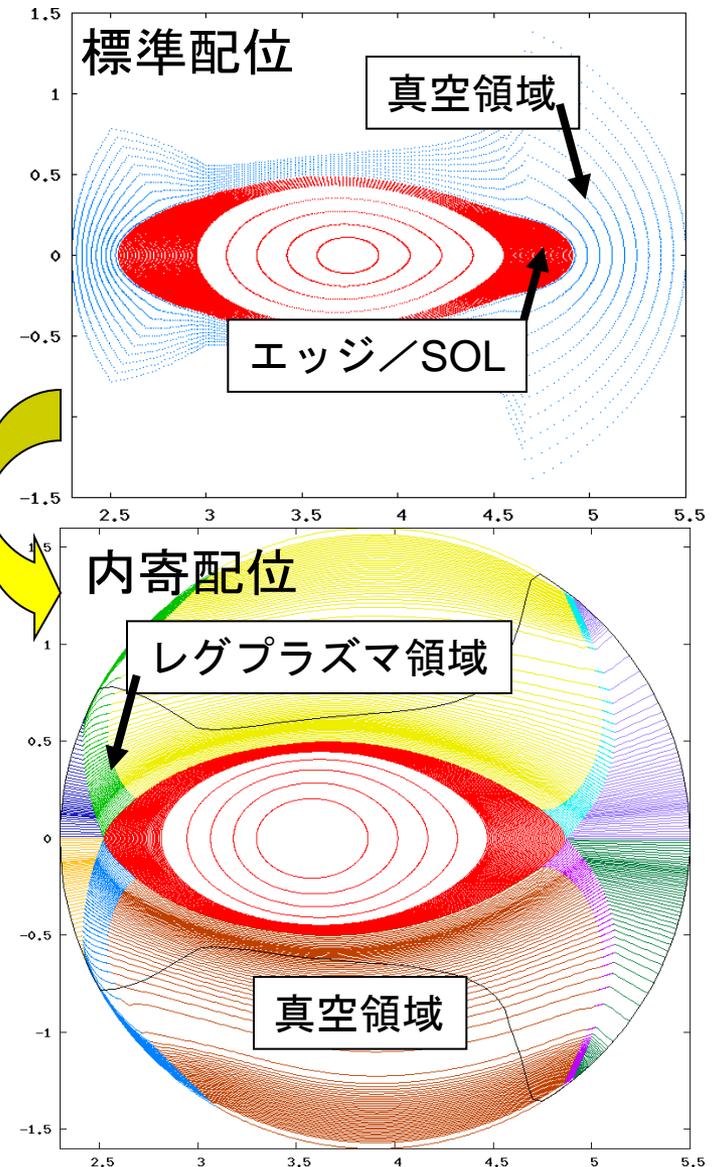
計算メッシュ概要

◆ 従来のEMC3-EIRENEメッシュ

- ダイバータレグがなく、プラズマの終端（Bohm条件）がSOLに存在する
- レグ中でのリサイクリングが比較的小さいオープンダイバータ配位では適用可能

◆ 開発したメッシュ

- ダイバータレグを追加したことで、強いリサイクリングのあるクローズドダイバータ配位でも使用可能
- 装置全体にわたるグローバルな輸送研究が可能
- 半自動作成ツールを開発（一部手動）
- 右図のメッシュに真空容器壁とダイバータ板を後から追加（開／閉で共通のメッシュを使用）

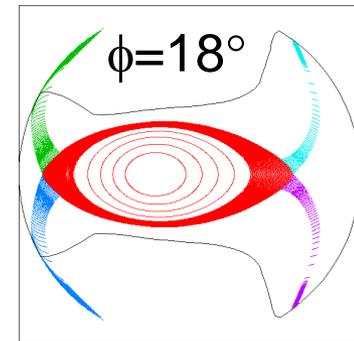
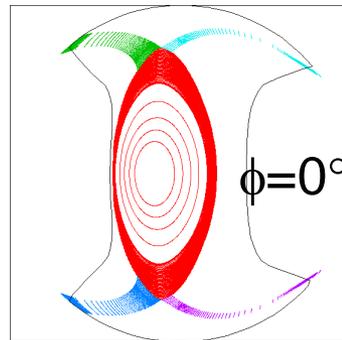
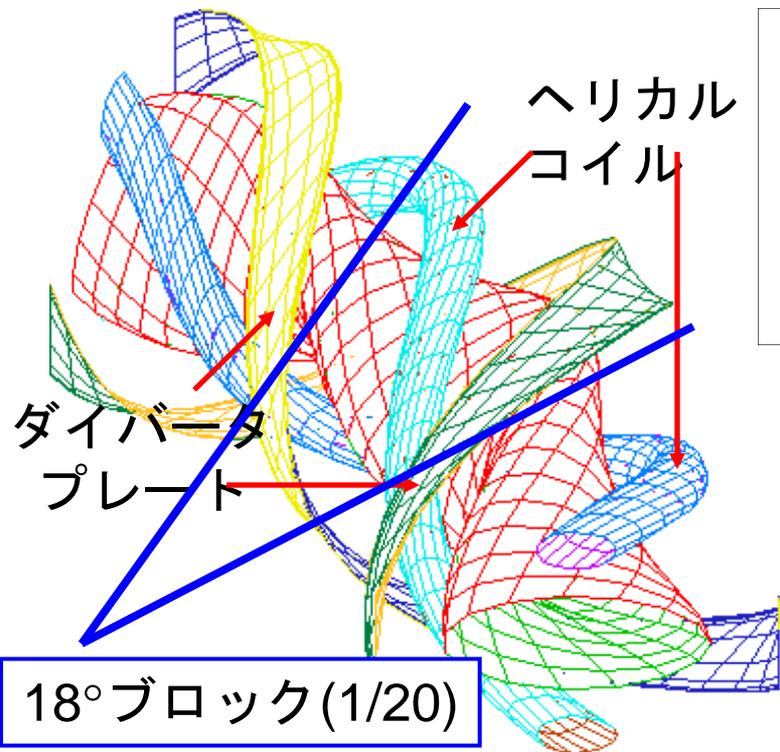




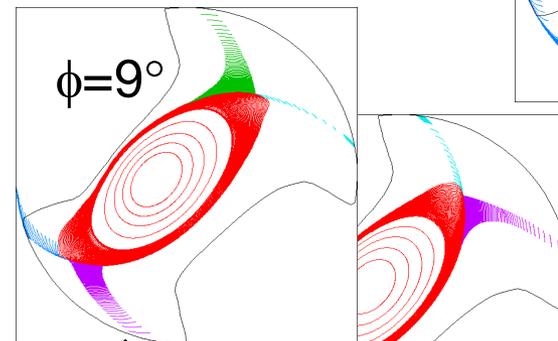
シミュレーションボックス

- ◆ LHDの $n=10$ 対称性を使い、 36° のトロイダルブロックに限定
- ◆ さらに、横長・縦長断面での上下対称を仮定して半分の 18° のトロイダルブロックを計算領域とした

0.25°刻みの各ポロイダル断面でメッシュを作成



36枚



36枚

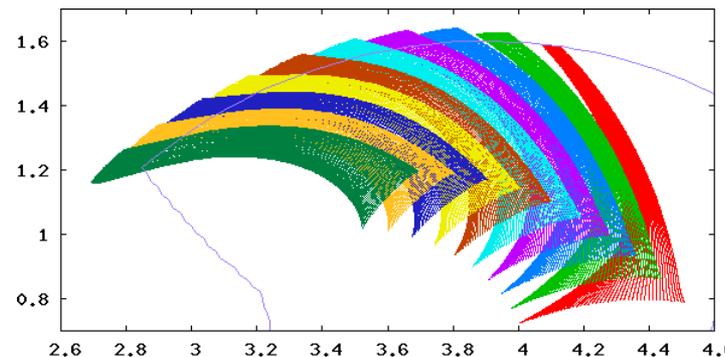
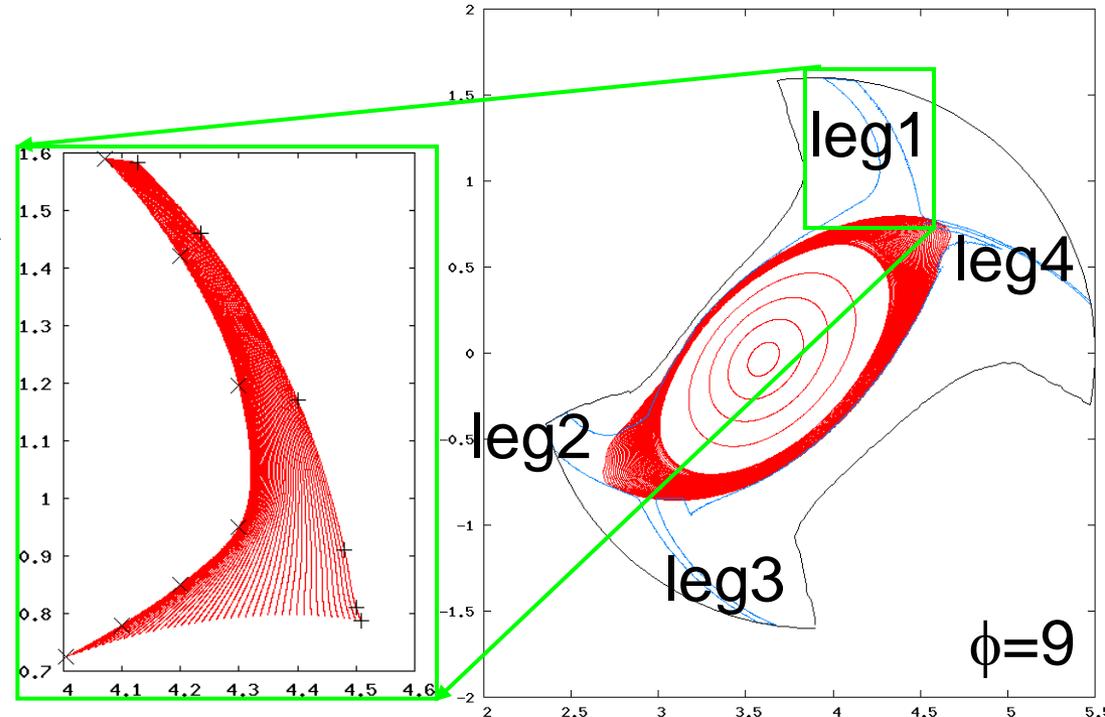
マッピング



ダイバータレグのメッシュ生成

◆ 手順

- $\phi=9^\circ$ 断面でレグの形状を指定（手動）
- 磁力線を追跡して $\phi=0\sim 9^\circ$ と $\phi=9\sim 18^\circ$ の両ブロックについてレグのメッシュを自動作成
- レグが伸び縮みするため、装置外にはみ出した分を先端にしわ寄せする（計算は行わない領域）



$\phi=0\sim 9^\circ$ のレグを重ねたもの

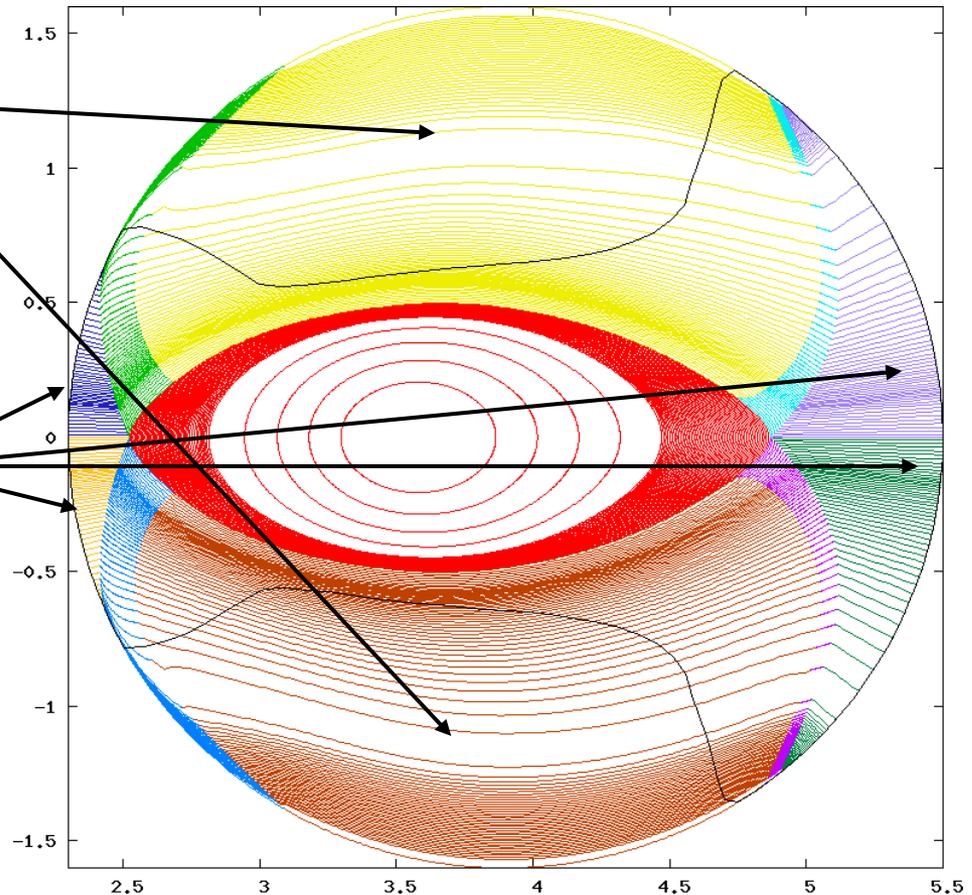


真空領域のメッシュ生成

◆ 領域の特性にあわせた生成法を開発

ホアッソン方程式の境界値
問題を利用した手法

幾何学的な作成手法



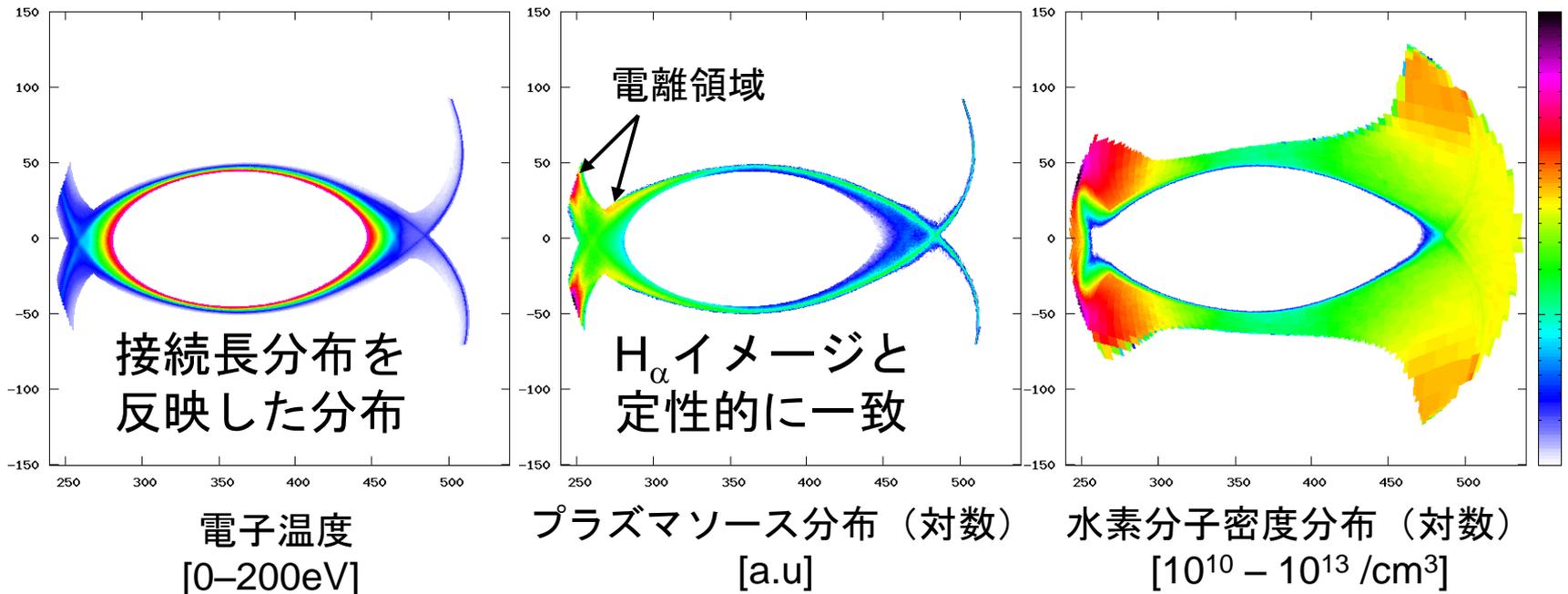


シミュレーション条件と計算例

◆ 計算条件

- 加熱入力：8MW
- 電子密度：コア境界で $2 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ に固定
- ダイバータ板：Bohm条件（流速＝イオン音速）
- 磁場配位：R=3.6m内寄配位（オープンダイバータ）
- 垂直輸送：全領域で一定の拡散係数（可変のバージョンもあり）

◆ プラズマと中性ガスの定常分布を実配位で計算可能





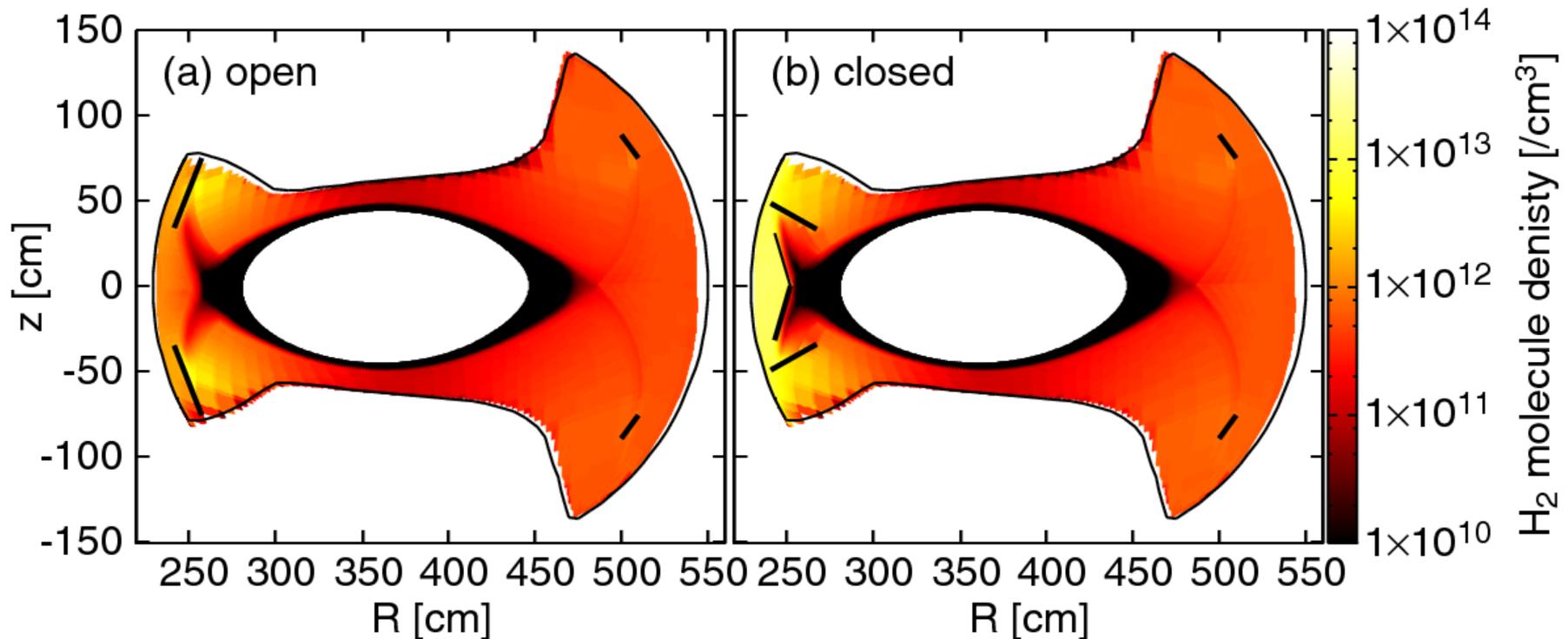
中性粒子の輸送解析

◆ シミュレーション条件

- 加熱入力: 8MW, LCFS電子密度: $2 \times 10^{13}/\text{cm}^3$

◆ 閉構造化による中性粒子の圧縮効果

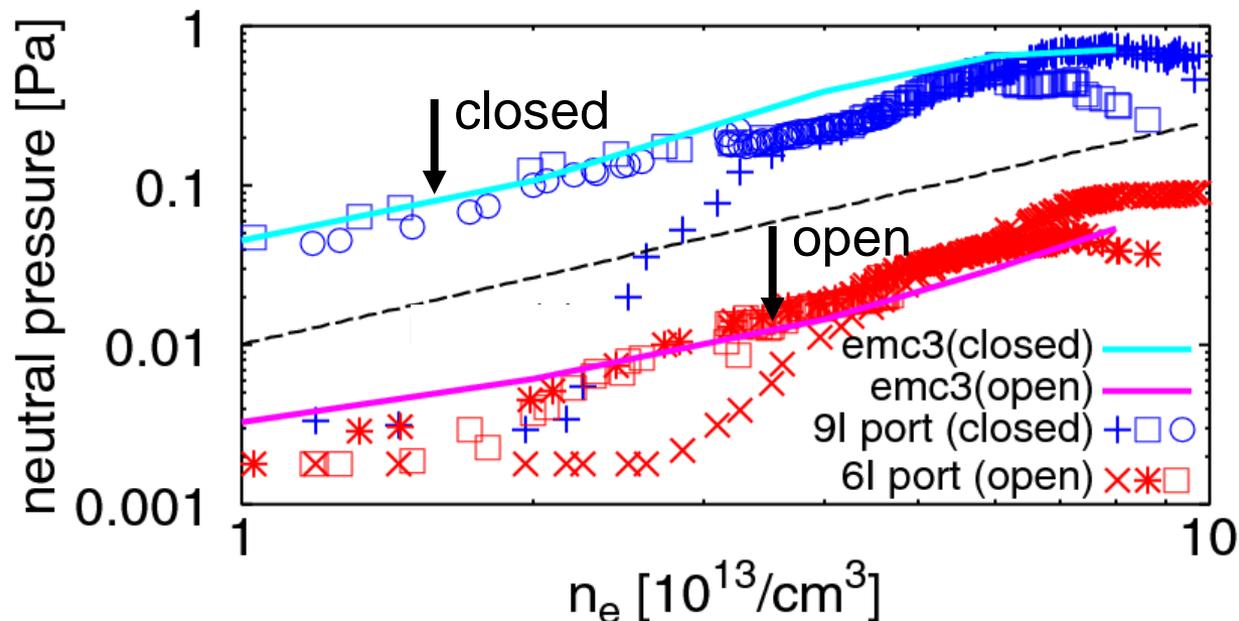
- ドーム構造体の下部の比較で約20倍の水素分子密度となった
- 実験でのガス圧比 (約10倍) とよく一致





中性粒子密度の電子密度依存性

- ◆ 電子密度(LCFS)スキャン
 - 加熱入力一定: 8MW
 - LCFS電子密度を $1\sim 8\times 10^{13}/\text{cm}^3$ でスキャン
- ◆ ドーム下部（オープン配位も同位置）での中性粒子圧力の変化
 - 計測とシミュレーションでよく似た依存性を示す
(絶対的な大きさ(2~3倍?)については計算条件に依存する)



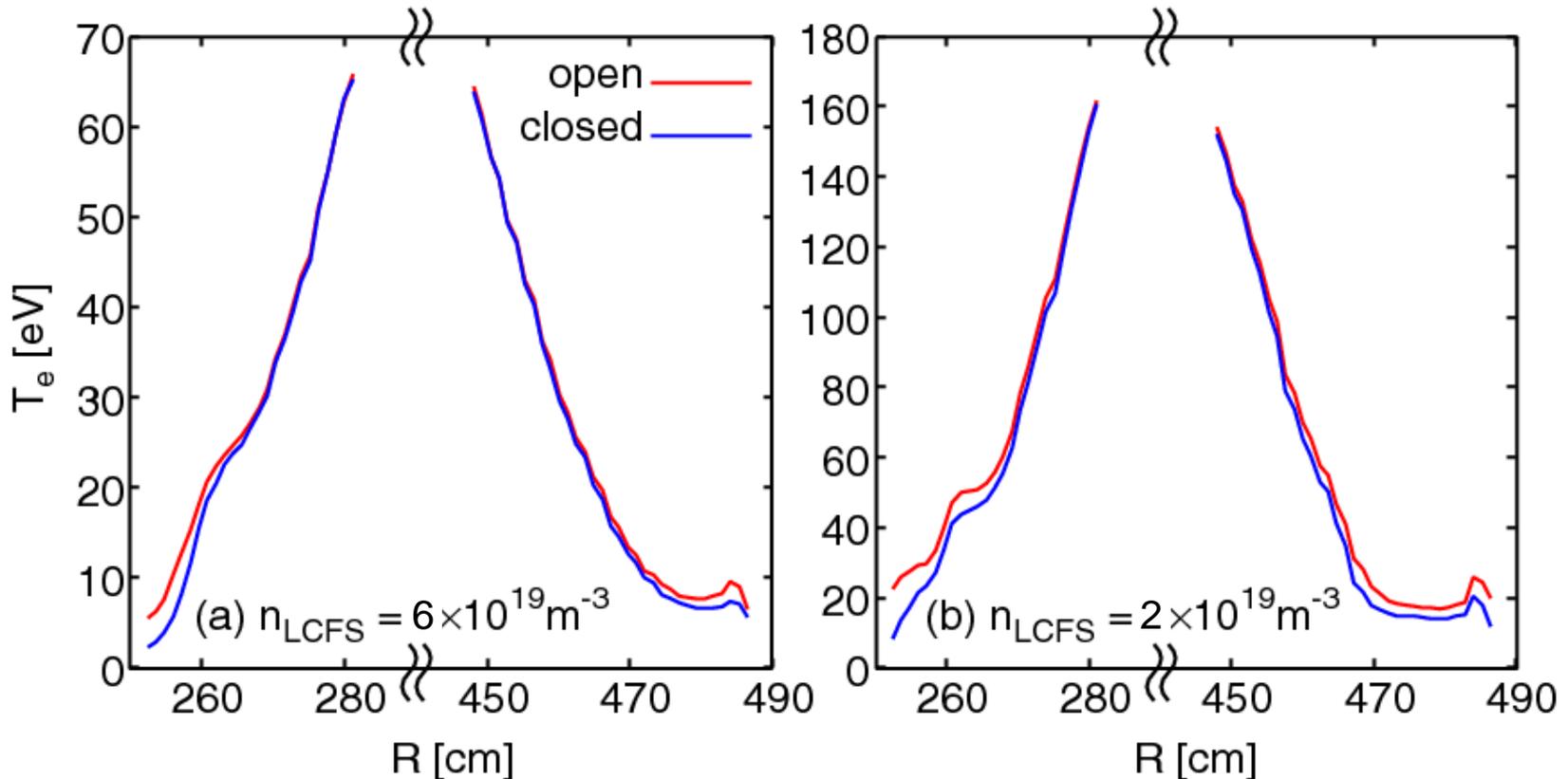
図：実験(#99368,#99370,#102301)とシミュレーションの比較



電子温度分布への影響

◆ 径方向電子温度分布

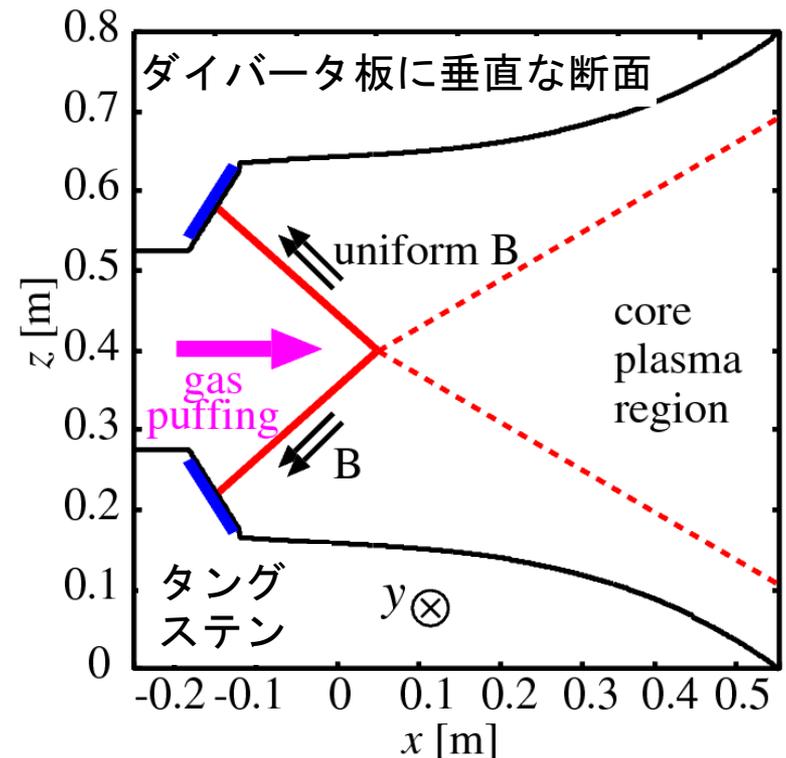
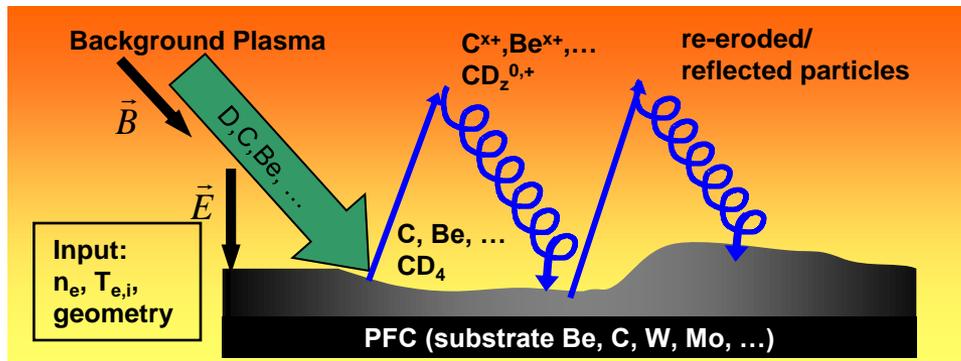
- トムソン散乱計測を模擬した温度分布図
(a) 高密度 (b) 低密度
- 中心側への影響小
- 周辺温度が低下 (中性粒子との相互作用効果)





ネオンによる壁損耗シミュレーション

- ◆ 不純物粒子追跡コード(ERO: **e**rosion and **r**edeposition)
 - 真空および背景プラズマ中のネオン輸送
 - 電離, スパッタリング, 再堆積, 反射, ……
 - 1次元の流体プラズマモデルを使用
- ◆ ガスパフを模擬してガスを導入
 - レグで電離したイオンによるタングステンの損耗分布の解析
 - ガス種による違いの解析





シミュレーション結果

◆ 損耗再堆積

- 損耗量に対しておよそ2/3の再堆積が発生
- タングステンの損耗領域と再堆積領域が見られた
- Neに比べ、Heでは物理スパッタによる損耗は非常に少なく、Arでは2倍程度の損耗が生じた

プラズマ分布の強い影響が予想される



EMC3-EIRENEの結果を使ったシミュレーションへ

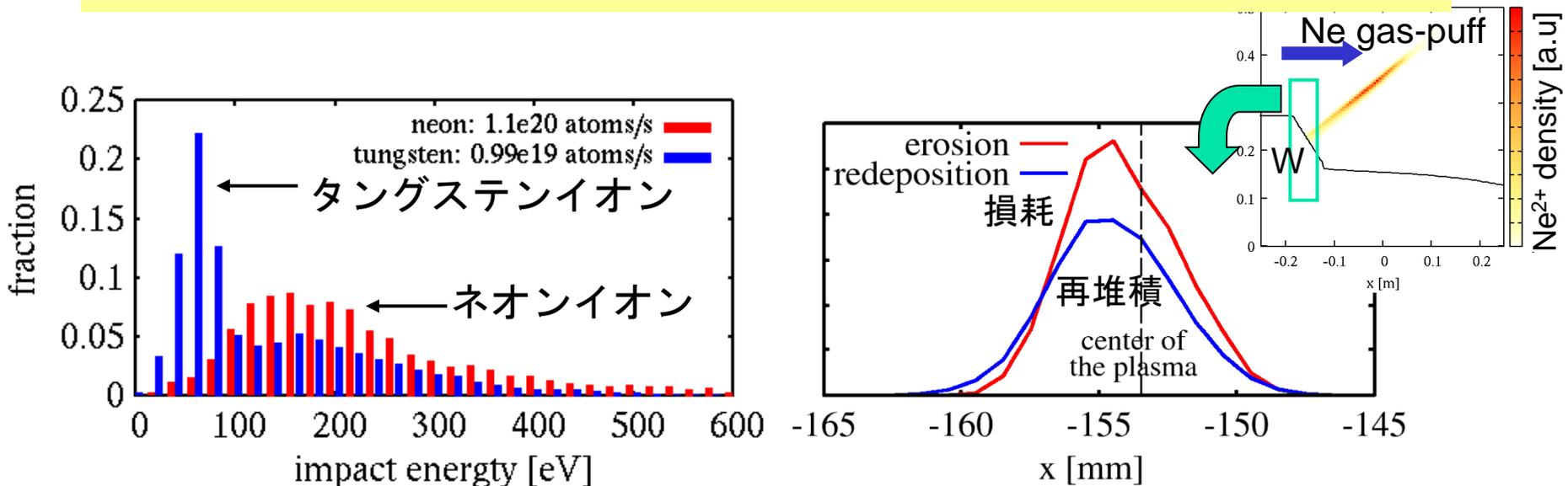


図: 壁入射エネルギー分布

図: 損耗再堆積分布

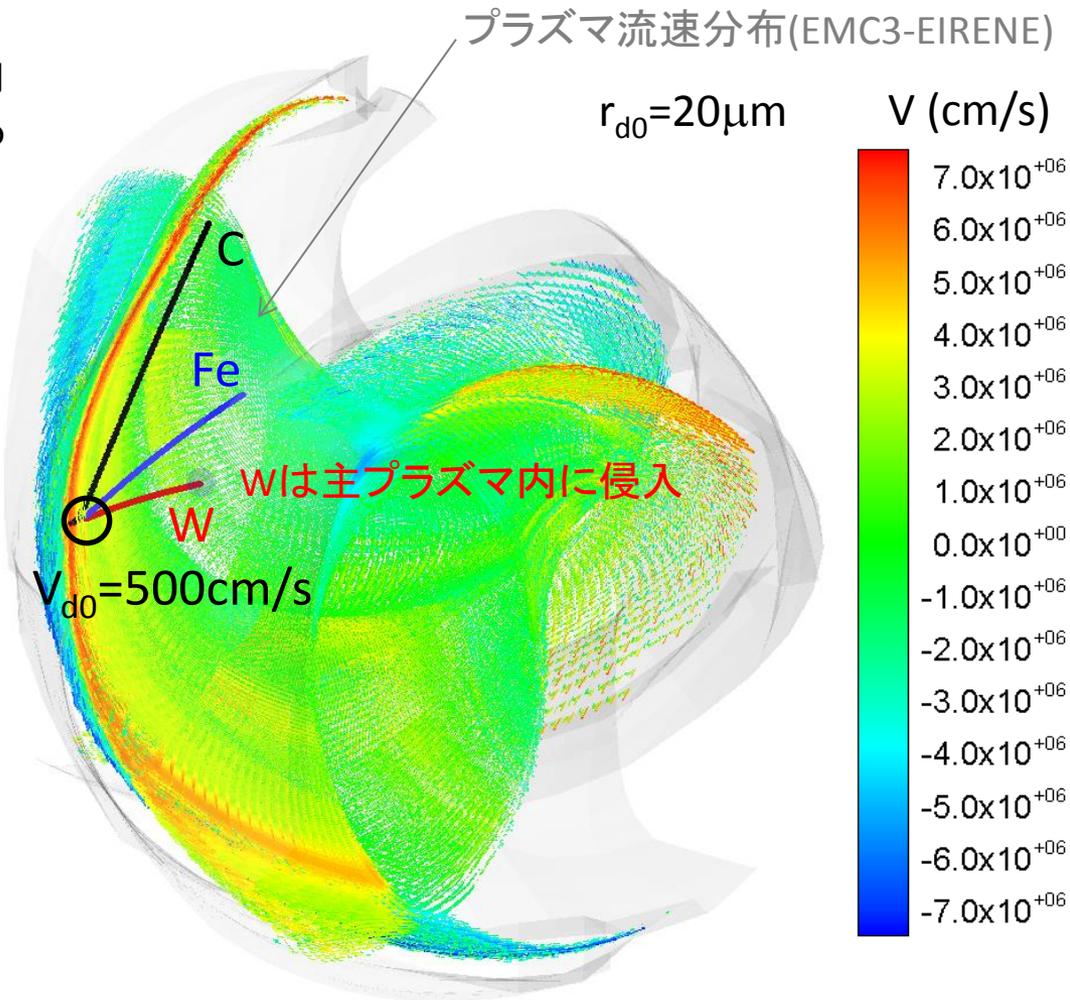


DUSTTによるダスト(C, Fe, W) 軌道の追跡計算

目的:

LHDでは真空容器壁あるいはICRFアンテナ内部で発生したダストが主プラズマ中に侵入することによって、ICRF加熱長時間放電が突然停止する現象等が観測されている。ダストがLHDプラズマに及ぼす影響を定量的に評価・解析するために、ダスト輸送シミュレーションコード(DUSTT)を適用した。

- ・ダイバーターレッグのプラズマによるダスト遮蔽効果の評価
- ・エルゴディック領域のプラズマによるダスト遮蔽効果の評価
- ・各種ダストに対するLHD周辺プラズマの遮蔽性能の評価
- ・三次元的に複雑な真空容器壁形状がダストの輸送に及ぼす影響の解析
- ・ステレオ視高速カメラによるダストの三次元軌道の計測結果との比較・検討
- ・その他



トーラス内側上部のダイバーター板上ストライク点から水平方向に各種ダストを射出した場合のダストの軌道の計算結果



まとめ

◆ コード開発

- EMC3-EIRENE: 周辺プラズマ流体コード (河村・小林・庄司・Feng)
- ERO: プラズマ対抗壁の損耗・再堆積コード (河村・Kirschner)
- DUSTT: ダスト輸送コード (庄司・田中 (金沢大))

◆ 3次元周辺プラズマ輸送(EMC3-EIRENE)

- LHDの磁場配位($R=3.6\text{m}$)を再現するシミュレーションが実用段階
- 中性ガス圧力の開／閉ダイバータ比較で実験とよく一致
- 閉ダイバータ化によって顕著に周辺の電子温度が低下

◆ 不純物ガスパフによるタングステン損耗(ERO)

- NeとArで物理スパッタによる大きな損耗が見られた
- 2/3程度のタングステン再堆積 (非対称な堆積分布?)
- EMC3-EIRENEのプラズマ分布をEROで使うことを今後検討

◆ ダストの軌道追跡計算(DUSTT)

- ダストの材質やサイズによって、プラズマフローによる影響が異なる
- レグのプラズマによって中心へダストが侵入しにくくなる傾向



付録：周辺プラズマ輸送研究グループ 概要

◆ グループ概要

- LHD周辺（SOL／ダイバータ）プラズマにおける輸送現象の理解とプラズマ性能向上への応用を目標に、理論およびシミュレーションモデル開発を行っている。
- LHDの3次元配位におけるグローバルなプラズマ・中性粒子・不純物の輸送を解く周辺プラズマ輸送コード(EMC3-EIRENE)を軸に、プラズマ壁相互作用、装置壁の損耗・再堆積などのシミュレーションコード群の開発を進めている。
- 複数の物理機構と領域のシミュレーションの連携から、総合的な周辺輸送シミュレーションの実現を目指す。

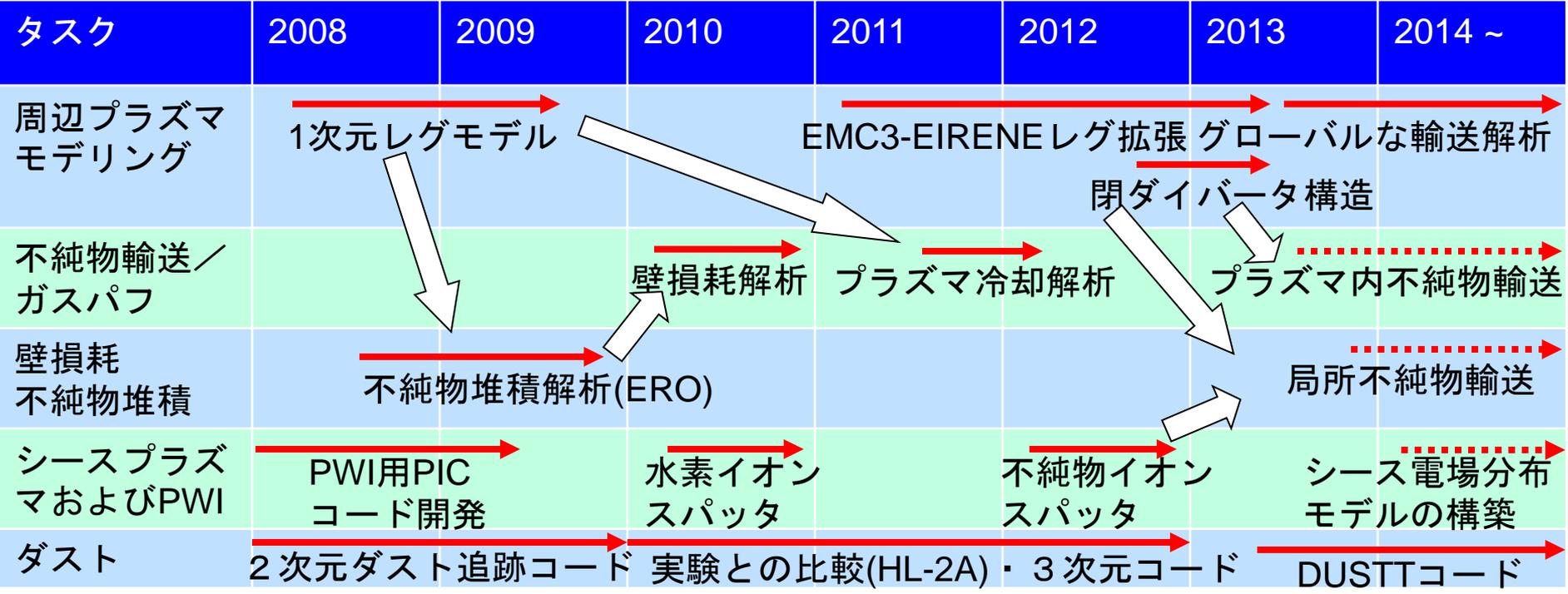
◆ コードおよびモデル

- EMC3（3次元配位でプラズマと不純物の輸送を解く流体コード）
- EIRENE（中性粒子輸送を解く粒子コード）
- ERO（背景プラズマ中で不純物輸送を解く粒子コード）
- DUSTT（ダスト輸送解析）
- 1次元PICコード（シース領域の解析）
- 1次元ダイバータプラズマ流体コード など



付録：周辺プラズマ輸送研究グループ計画

◆ ロードマップ



◆ 研究テーマ

- EMC3-EIRENEによるプラズマおよび不純物輸送解析
- EMC3-EIRENEおよびEROによる壁損耗・再堆積の解析
- PICコード開発や要素モデル開発に関する海外との共同研究