

平成23年度 合同研究会

筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム  
スクレイプオフ層とダイバータ物理サブクラスター  
ブランケットサブクラスター  
双方向型共同研究会合

2011/7/20-21 つくばサイエンスインフォメーションセンター

# 非接触プラズマ及びタングステン輸送 のシミュレーションの現状

---

星野一生

原子力機構



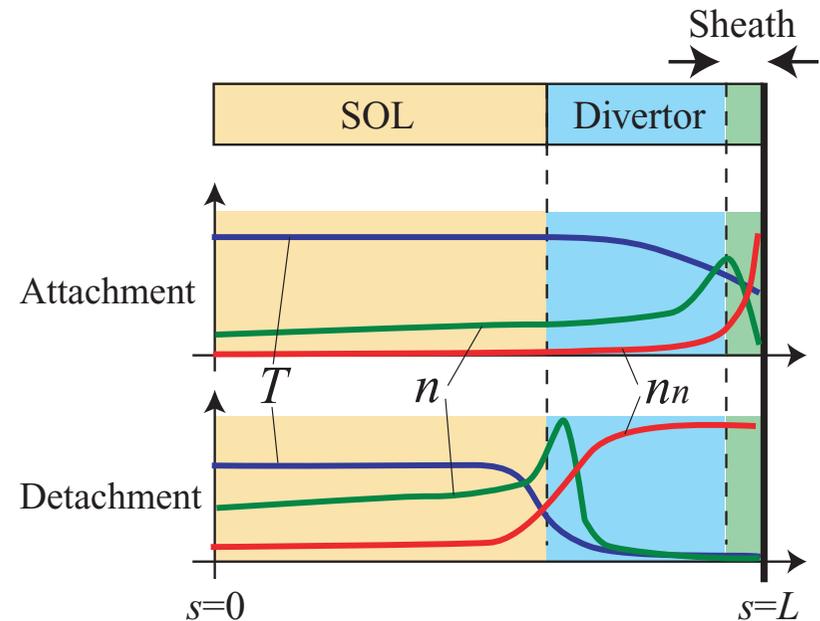
# 非接触ダイバータプラズマシミュレーションの 現状

---

ダイバータに集中する膨大な熱負荷の低減に対して、**非接触ダイバータプラズマ**概念が重要

## 非接触ダイバータの基本メカニズム

- エネルギー損失
  - 不純物放射、リサイクリング
- 運動量損失
  - イオン-中性粒子間の荷電交換
- イオン粒子損失
  - 体積再結合

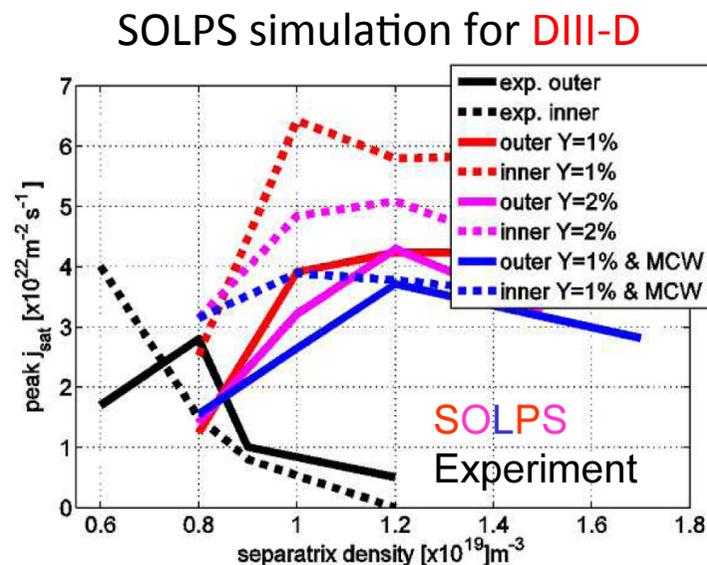
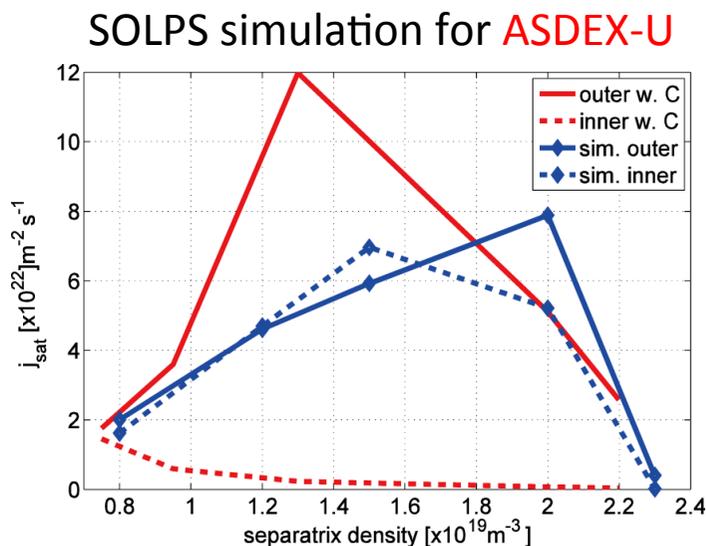


しかし、トカマク実験で観測されるような非接触ダイバータプラズマ、特に**著しい粒子束の減少**の再現は、多くの実験解析・設計に用いられている2次元ダイバータコードにとって未だ課題。

# 2次元ダイバータコードによる非接触ダイバータモデリング

## SOLPSコードによる非接触ダイバータシミュレーションの例

上流密度に対するダイバータへの粒子束 M. Wischmeier, JNM2009



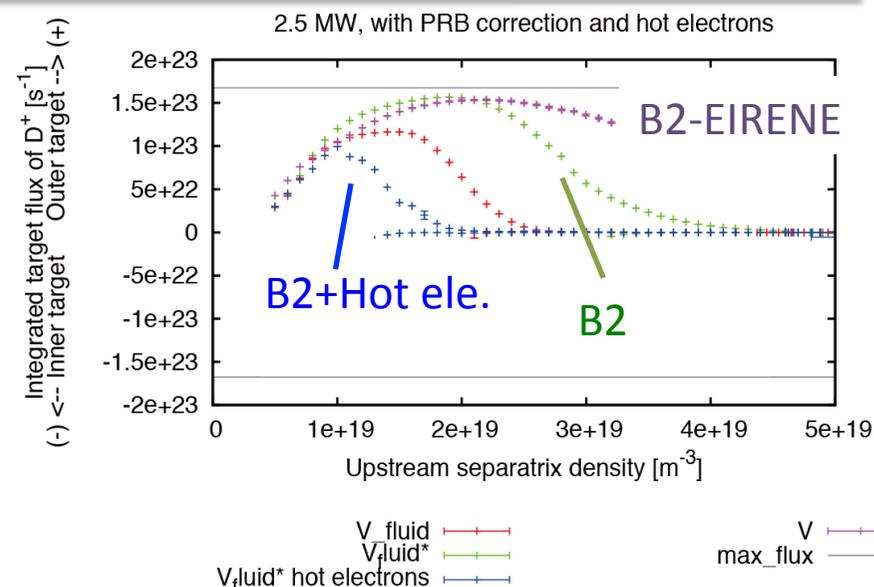
- ASDEX(左図)の外側DIV(実線)は、実験を比較的よく再現できている。
- その他は、粒子束の減少が始まる 上流密度 が実験と大きく異なるもしくは起こらない。
- 内外非対称性が実験に 比べて小さい

非接触ダイバータモデルの改善を目指してITPA SOL/ダイバータグループの元でコード間ベンチマーク活動が進められている。

# 非接触ダイバータモデル改善に関連した試み

## SOLPS

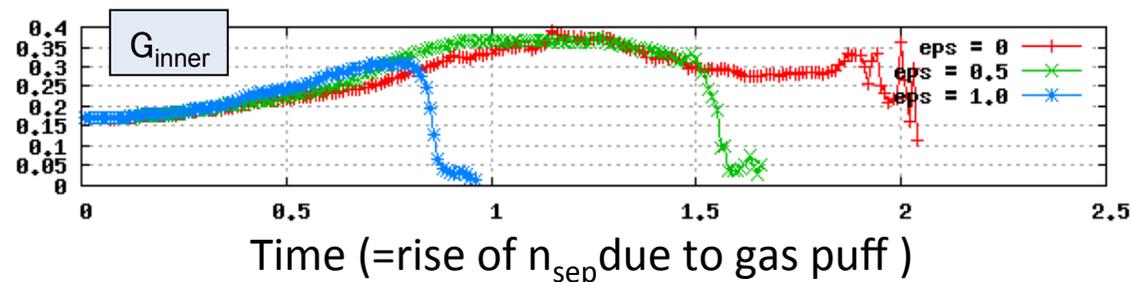
- ・非接触ダイバータ内外非対称に対するモデル・仮定の検討(D.Coster, PSI19)  
→ hot ele.の寄与大の可能性
- ・解析領域(計算セル)の拡大  
(W.Dekeyser PSI19, M.Baelmans NF2011)



## EDGE2D

- ・径方向輸送係数の衝突周波数依存性(S.Wiesen, PSI19)

$$D_{\perp}(v^*) = D_{\perp ref} \cdot \left( \frac{v^*}{v_{ref}^*} \right)^{\epsilon}$$



## UEDGE

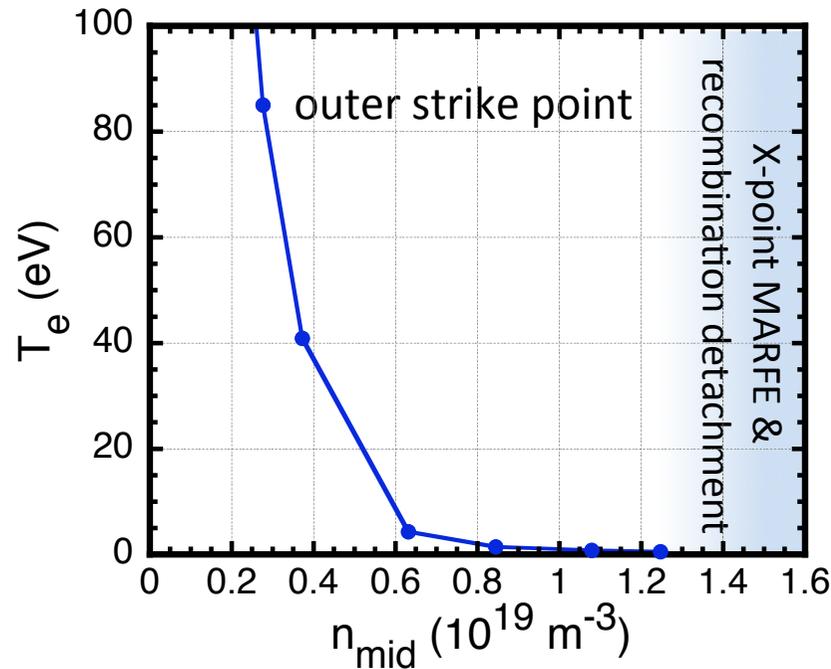
- ・モデル・条件の検証(M.Groth, PSI19, ITPA 15<sup>th</sup> SOLDIV)
  - $2xY_{chem} \rightarrow P_{rad}, I_s$  は改善するが、他の分光計測と矛盾
  - $n_{sep} \times 1.3 \rightarrow X$ 点近傍まで低温下するが密度ピークはダイバータ近傍のまま

# SONICによるJT-60Uダイバータシミュレーション例

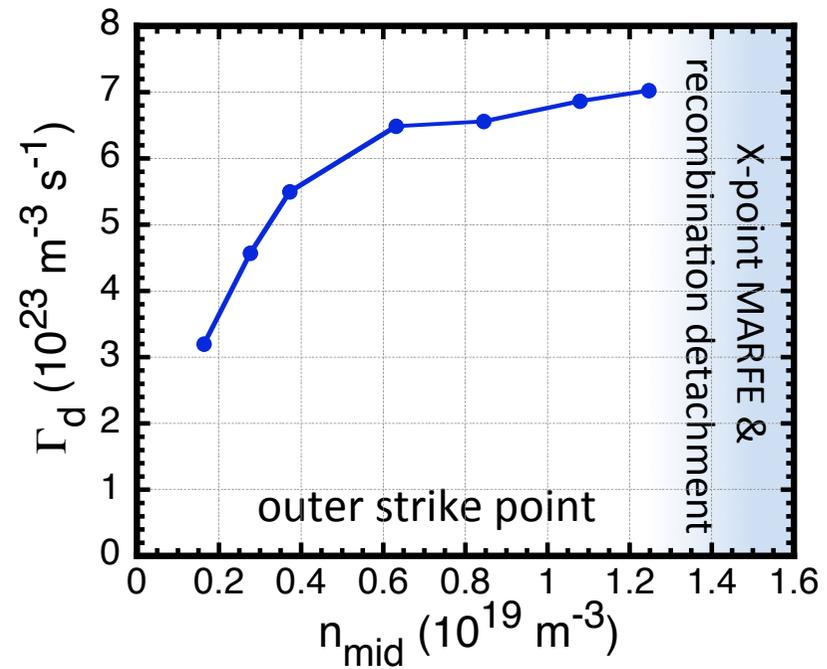
## JT-60U L-mode放電

$$Q_{in} = 3.2 \text{ MW}, G_{in} = 0.8 - 4.0 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}, G_{puff} = 0 - 20 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$$
$$D = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}, c_i = c_e = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$$

電子温度



イオン粒子束



- 実験に比べて低い $n_{mid}$ でダイバータの電子温度は数eV以下
- イオン粒子束のroll overは見られない (実験ではave  $n \sim 2 \times 10^{19}$ でロールオーバー)
- シミュレーションにおいてより高い $n_{mid}$ では体積再結合による粒子束の減少
- 実験と同程度の $n_{mid}$ でX点MARFE

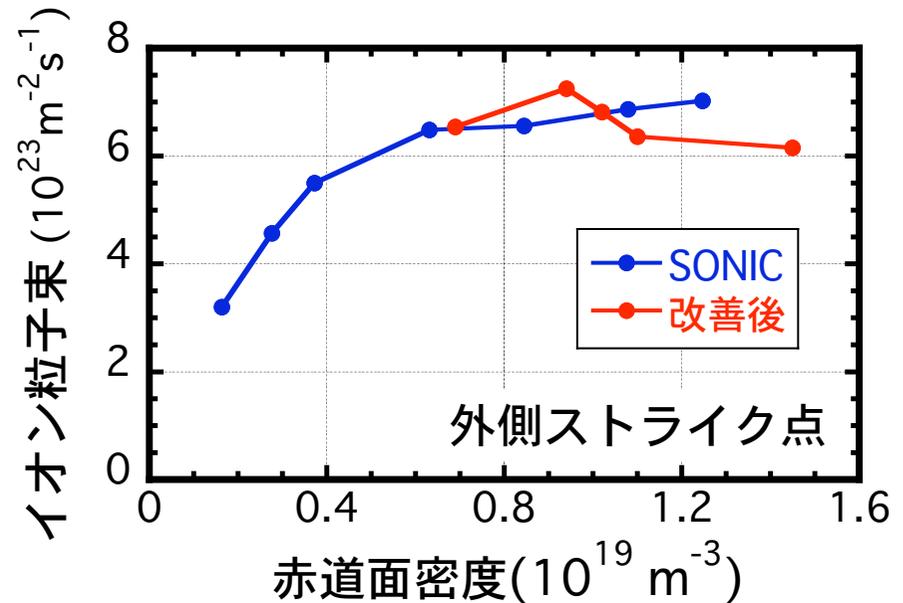
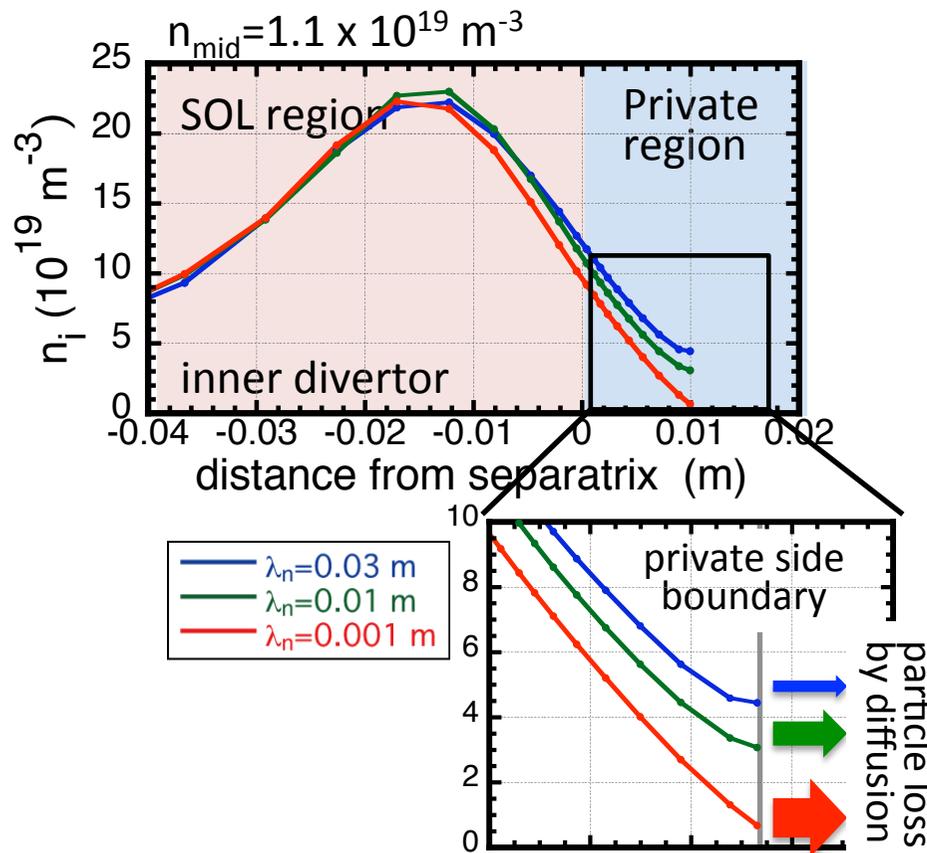
# SONICにおける非接触ダイバータの改善検討

7 / 16

実験データとの比較に基づくSONICシミュレーションにおける問題点の把握と、物理モデル・仮定が非接触ダイバータプラズマ特性に与える影響を検討

(K. Hoshino JNM 2011)

## プライベートプラズマの境界条件検討



プライベートプラズマ条件の再検討と壁排気効果の考慮により、赤道面密度に対するダイバータへのイオン粒子束の傾向がやや改善。

- 他の効果 (超音速流、炭化水素の解離、SOL流、ion flux limiter) についても検討・継続中。
- 低温・低密度プラズマを安定に解析できるようコードの改良も必要

# 非接触ダイバータモデリングのまとめ

---

- 現状、2次元ダイバータコードにより実験で観測されるような非接触ダイバータプラズマ(粒子束低減、内外非対称性)を再現することは困難
- 非接触ダイバータモデルの改善を目指してコード間ベンチマーク(ITPA)、及び各コードでモデルの再検討が進行中

## 非接触ダイバータに関連すると考えられる開発課題

- 径方向輸送
- 運動論効果 (Flux Limiter, Supra-thermal electron, etc)
- 境界条件 (ダイバータ、SOL端)
- 中性粒子輸送、原子分子データ
- 第一壁とのリサイクリング (解析領域の拡張)
- ドリフト、電流
- etc

# タングステン輸送シミュレーションの現状

---

# Transport of tungsten impurity in SOL and divertor

---

The W transport, especially **long range transport**, is not understood well compared with low-Z impurity transport.

## Important physics for the W transport

### Finite Larmor radius (FLR) effect :

prompt re-deposition, transport in sharp plasma gradient

### Plasma wall interaction (PWI) :

self-sputtering, reflection, incident angle, emitted angle

### Coulomb collision, thermal force, etc

## Modeling of the long range W transport

### Fluid Approach

Bundle scheme: SOLPS(IPP), EDGE2D(JET)

Full charge state: EMC3(IPP)

### Monte-Carlo approach

Guiding-center (GC) approximation: DIVIMP(CA), (IMPMC(JA))

Full orbit: IMPGYRO(JA), ERO(Jülich, short range only?)

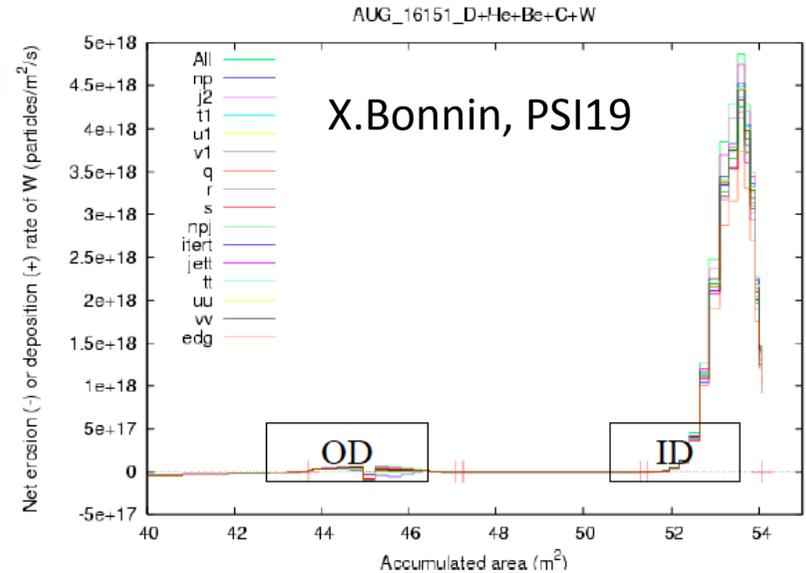
# Modeling of long tungsten transport

## Fluid Approach Bundle Scheme: SOLPS, EDGE2D

W輸送を扱うと75セットの流体方程式が増加  
 →計算時間は約100倍に増加

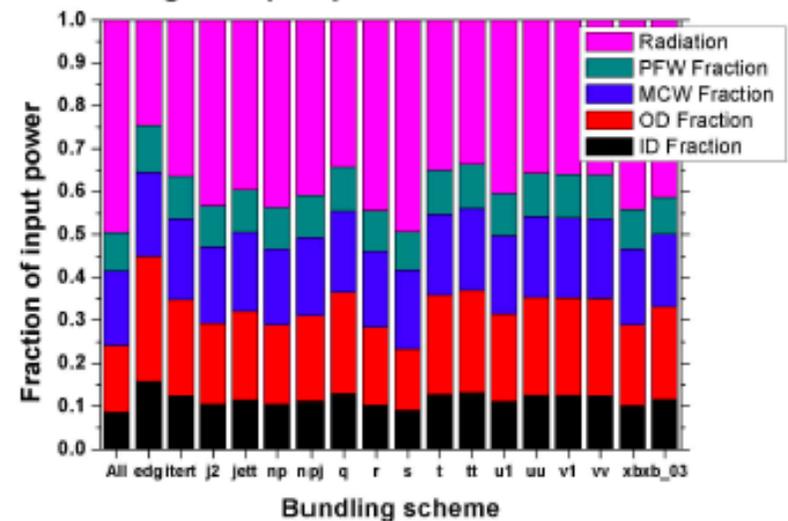
ある価数範囲でまとめて1流体とすることで  
 計算コスト削減 → **Bundle Scheme**

Name	ns	Charge State																											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
All	75	[Colorful grid]																											
np	36	[Colorful grid]																											
j2	27	[Colorful grid]																											
t1	11	[Colorful grid]																											
u1	11	[Colorful grid]																											
v1	11	[Colorful grid]																											
q	10	[Colorful grid]																											
r	10	[Colorful grid]																											
s	10	[Colorful grid]																											
xb	23	[Colorful grid]																											
xb_03	9	[Colorful grid]																											
npj	27	[Colorful grid]																											
j	27	[Colorful grid]																											
itert	15	[Colorful grid]																											
jett	24	[Colorful grid]																											
tt	10	[Colorful grid]																											
uu	10	[Colorful grid]																											
vv	10	[Colorful grid]																											
edg	10	[Colorful grid]																											
Configuration		W	Ta	Hf	Lu	Y	Tm	Er	Ho	Dy	Tb	Gd	Eu	Sm	Pm	Nd	Pr	Ce	La	Ba	Cs	Xe	I	Te	Sb	Sn	In		
		6s	5d			4f			5p			4f			5s			4f						4f					
		Outermost electron shell																											



X.Bonnin, PSI19

### Sharing of input power across channels



バンドルすると放射損失を低く見積もる傾向にあり、  
 エネルギーバランスの観点から改善が必要。

# Transport of tungsten impurity

## Advantage / Disadvantage of each approach

	fluid		MC	
	Full states	Bundle	Full orbit	GC
<b>Computer resource</b> (cpu time, memory, etc)	middle	small	huge	large
<b>Coupling with plasma</b>	consistent		fix / iterative	
<b>Ion temperature</b>	Share with plasma		individual	
<b>Kinetic effect</b> (ex. Non-local transport)	model		appropriate	
<b>Finite Larmor radius effect</b>	model		include	model
<b>PWI model</b> (sputtering, reflection)	database empirical/analytic formula		empirical/analytic formula integration with PWI code	

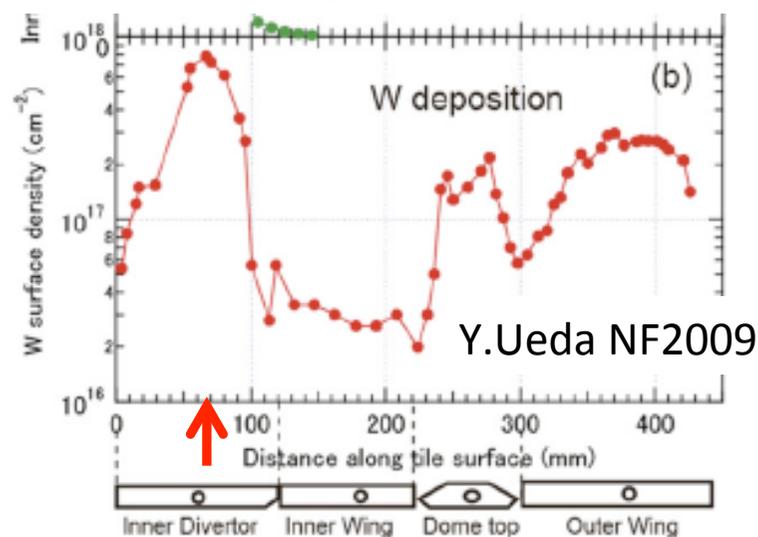
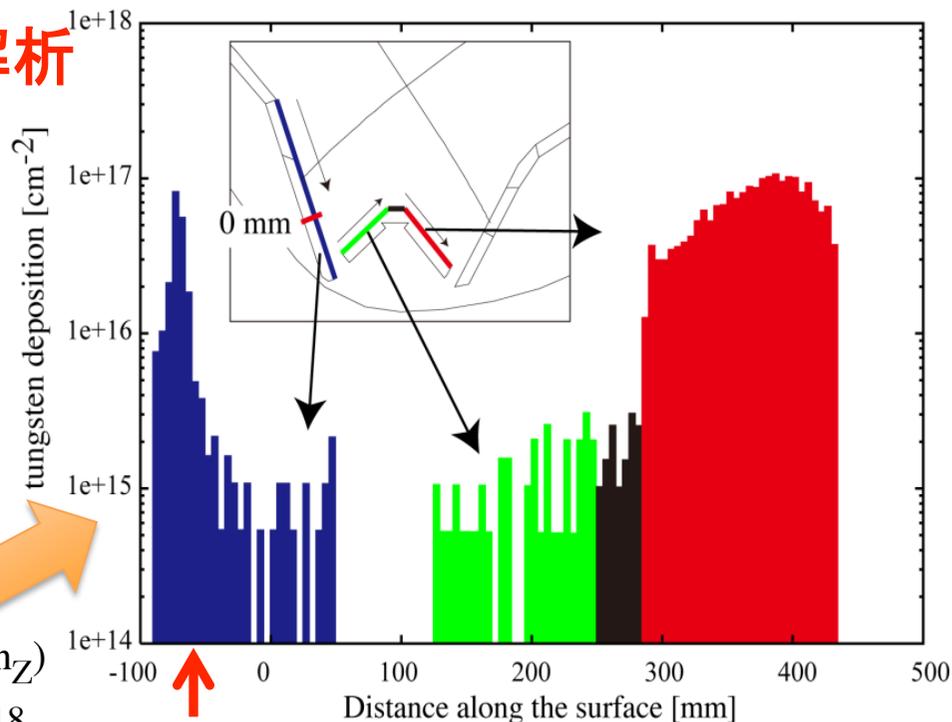
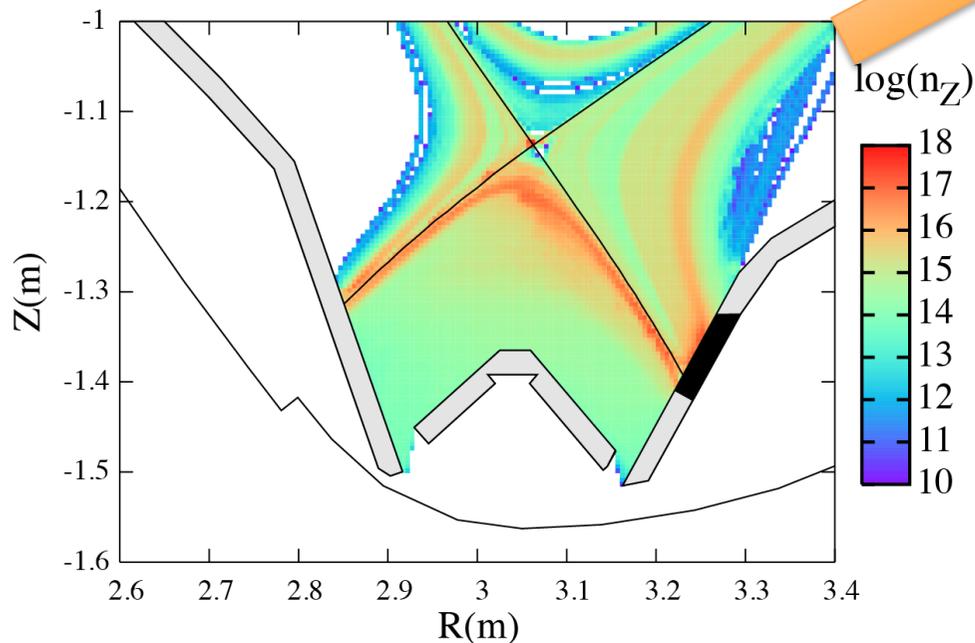
Full orbit trace is better for W transport because of FLR effect and PWI. Huge computer resource will not be large problem in CSC

In future, **the modeling of the W transport in the core region and the integration** are also necessary to estimate the core contamination.

## IMPGYROによるJT-60UのW輸送解析

SOL: イオン化後、磁力線に沿って運動  
 プライベート: 中性粒子としての運動が比較的多い

外側ドームウイングへの堆積は実験とよく一致している



# コア領域におけるタングステン輸送

基本的には、新古典輸送に加え、乱流輸送も重要であると考えられている。

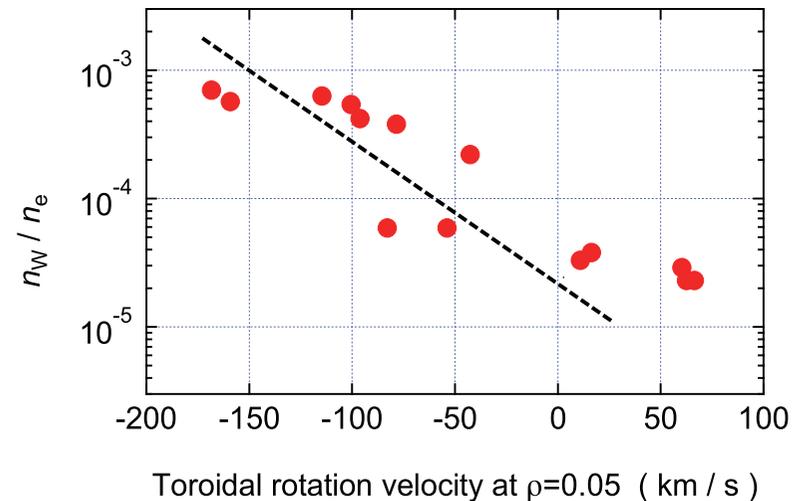
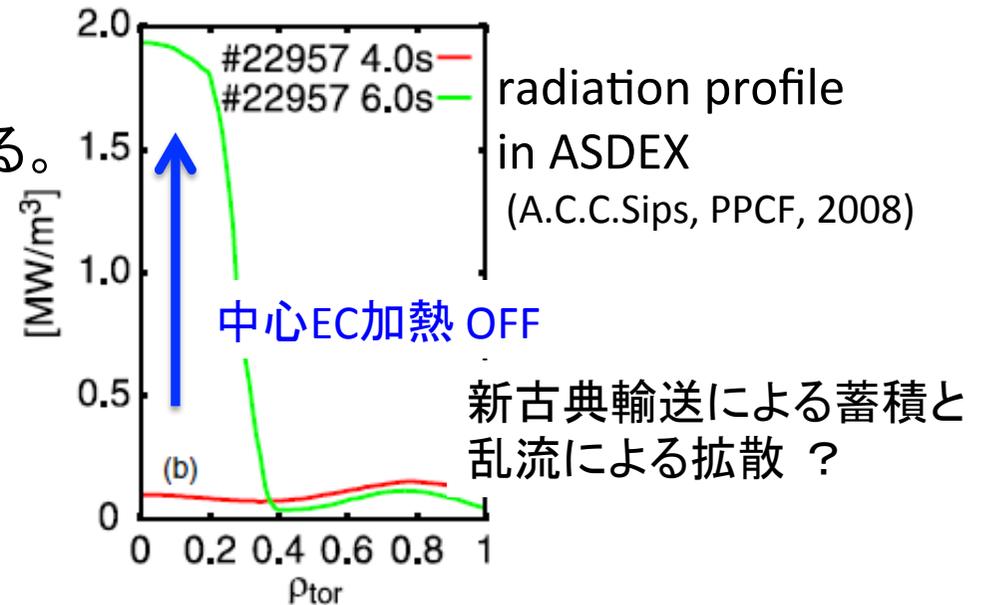
## 新古典輸送

$$\frac{1}{n_Z} \frac{dn_Z}{dr} = \frac{Z}{n} \frac{dn}{dr} + \frac{\alpha}{T} \frac{dT}{dr}$$

## 乱流輸送

(高Z) 不純物に対する乱流モデリングはあまり進んでいない

また、JT-60Uで観測されたようなトロイダル回転に伴うコアへのW蓄積は従来の新古典理論では説明できない。



W accumulation vs toroidal rotation in JT-60U (T.Nakano, PSI2010)

# トロイダル回転に伴う高z不純物のピンチモデル

## トロイダル回転に起因する高z不純物のピンチ機構 (K.Hoshino NF2011)

### •PHZ

高z不純物のドリフト軌道に沿った温度変化とそれに伴う電離・再結合過程に起因するピンチ

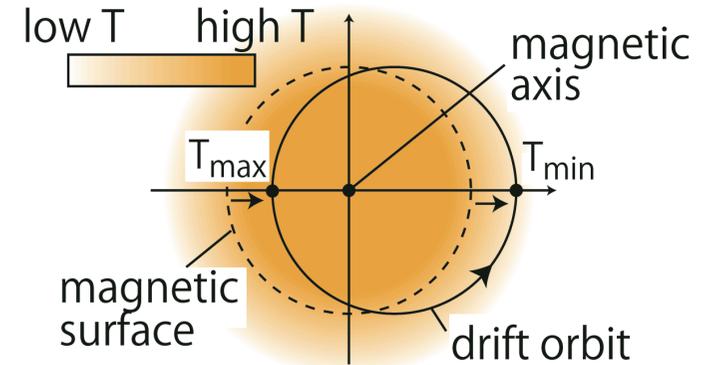
$$v_{PHZ} = \langle v_r \rangle = \frac{v_{d0}^2}{2Z_0} \frac{C_T C_{\nabla T}}{C_Z^2 + \omega^2}$$

### •E<sub>r</sub>ピンチ

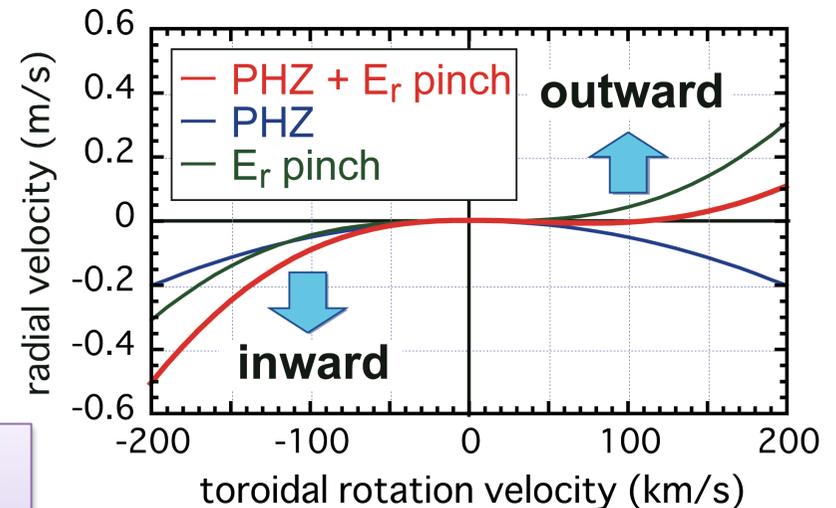
クーロン衝突を通じた径電場の影響による高z不純物の外向き・内向きピンチ

$$v_{Er} = \frac{(1-2\alpha)k\Delta_0^2}{2(1-\alpha)^2} \frac{v_c}{1+(v_c/\omega_b)^2}$$

これらのピンチ効果は、JT-60Uで観測された炉心へのタングステン不純物蓄積量のトロイダル回転依存性を説明する。



ドリフト軌道に沿った温度と価数の変化



トロイダル回転速度に対するピンチ速度の評価

# タングステン輸送モデリングのまとめ

---

## 周辺ダイバータ領域

- タングステン輸送解析のための流体コード、モンテカルロコードの開発が進んでいる。
- どのコードも一長一短があるので、評価すべき物理量、その精度、計算資源(計算時間, CPU数, メモリ)等を考えながら、最適なコードを選んで解析を行っていくべき
- 今後の課題  
コードの妥当性検討、有限Larmor半径効果、  
プラズマの解析領域と第一壁・ドームとのギャップ

## コア領域

- 乱流モデルや新しいピンチモデルの開発が進んでいる。
- 背景プラズマの輸送コード、および周辺コードと統合し、グローバルでセルフコンシステントな解析が必要
- 今後の課題  
1次元輸送コードに組み込めるような簡約化乱流モデル  
ELMによる吐き出し(動的な輸送効果の定常モデルへの反映)

**共通課題**: 原子データの整備・検証