



2008. 12. 18

プラズマ核融合学会専門委員会  
「プラズマ原子分子過程の基礎研究  
とプラズマ研究の融合と発展」

## 核融合境界層プラズマモデリングと 原子・分子データ

慶應義塾大学工学部  
物理情報工学科  
畑山 明聖、藤間光徳

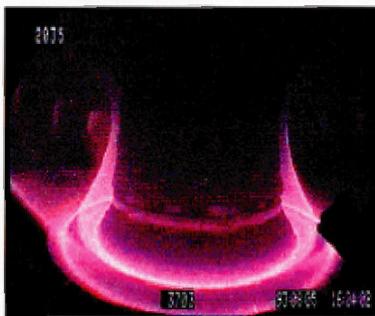
日本原子力研究開発機構  
星野一夫

大宅薫教授、井内健介氏(徳島大学)、  
上田良夫教授(大阪大学)、滝塚知典氏、清水勝宏氏、  
仲野友英氏、朝倉伸幸氏(日本原子力研究開発機構)、  
X.Bonnin(パリ13大学)、D.P.Coster, R.Scheider(IPP)

## 核融合境界層プラズマとは

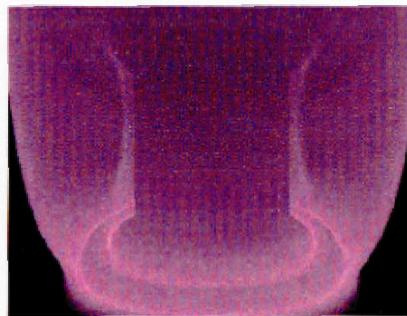
### Direct modelling of experimental signals

Example: CCD  $H_{\alpha}$  camera



Experiment

**ASDEX-U**



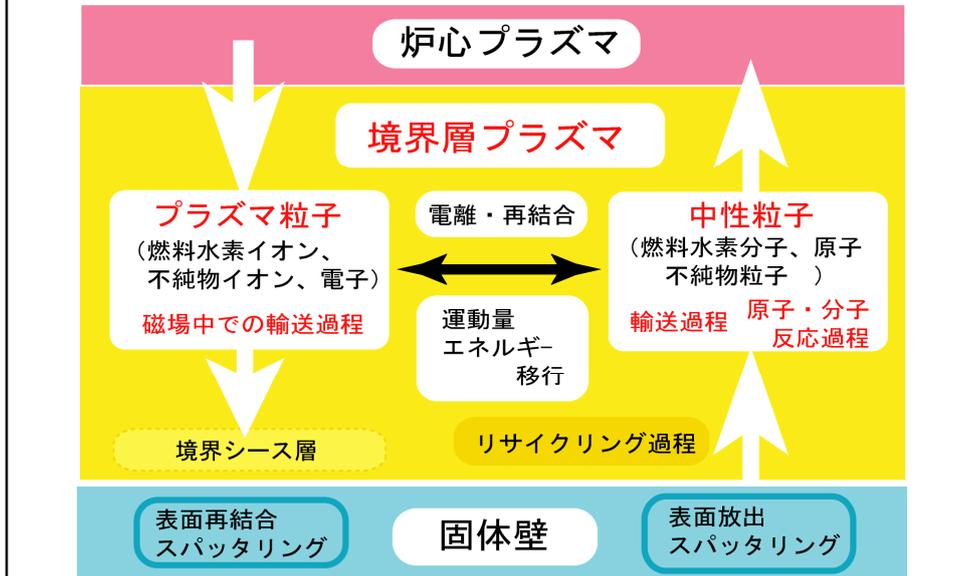
Modelling

**B2-EIRENE**

By R.Schneider, D.P.Coster

## 核融合境界層プラズマのモデリング (2)

### 境界層プラズマのモデリング



## 数値シミュレーションコード

### 数値シミュレーションコード

**プラズマ：不純物イオンを含む 多種 流体モデル**

**B2/B2.5, UEDGE, EDGE2D, SOLDOR...**

**中性原子・分子：モンテカルロ粒子モデル(含む不純物中性粒子)**

**EIRENE, DEGAS, NIMBUS, NEUT2D, ...**

**不純物イオン：モンテカルロ粒子モデル**

**IMPMC, DIVIMP, IMPGYRO, ...**

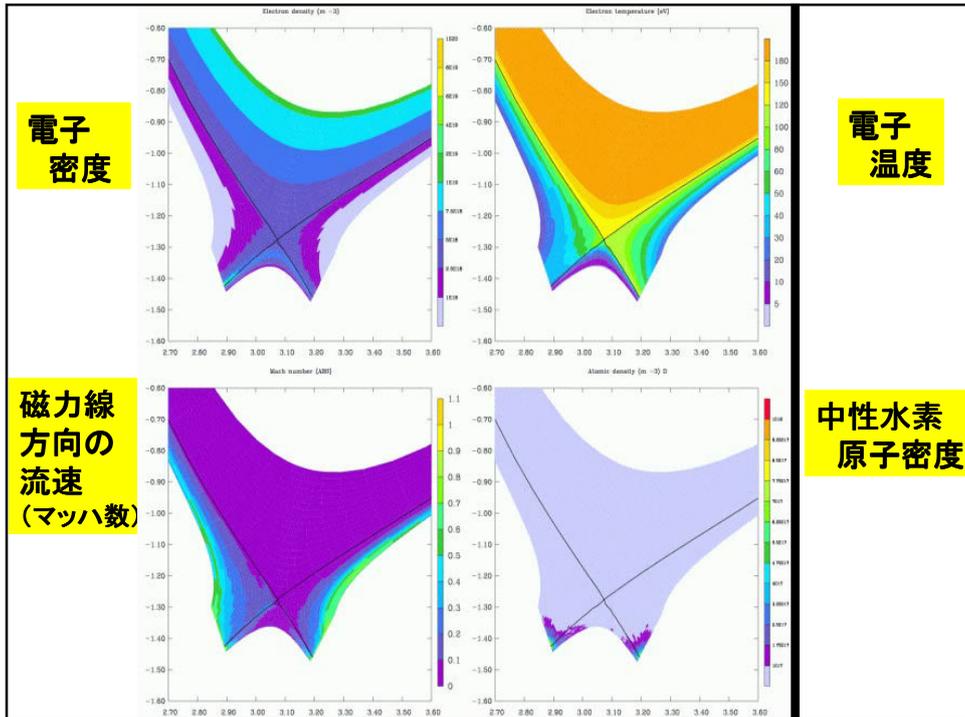
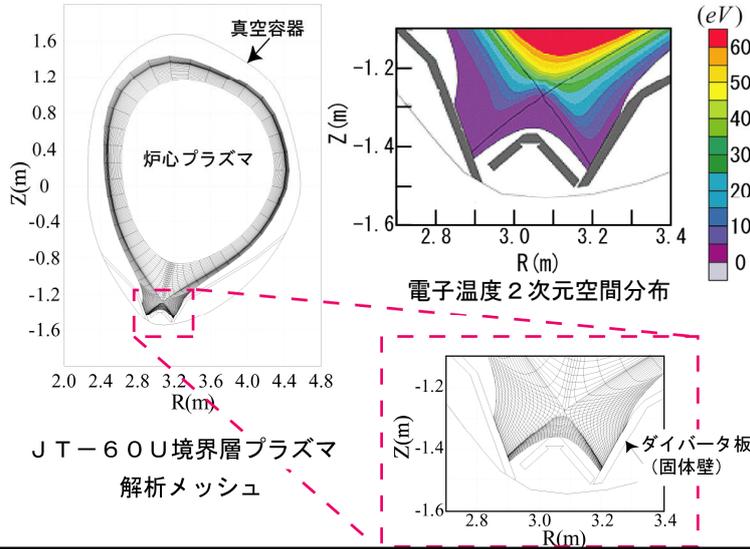
↓ 統合コード

**SOLPS (B2+EIRENE, B2.5+EIRENE),  
SONIC (SOLDOR+NEUT2D+IMPMC),**

...

# B2-EIRENEによるシミュレーション: JT-60U

境界層プラズマシミュレーション(低温非接触プラズマ構造の形成)



## Flow Velocity Profiles for the Attached and Detached State

$I_p = 1.2\text{MA}$ ,  $B_T = 3.5\text{T}$ ,  $q_{\text{eff}} = 4.4$ ,  $L$ -mode

**B2 multi-fluids code for ions :  $D^+$ ,  $C^+$ - $C^{6+}$**   $D_{\perp} = 0.3\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\chi_{\perp}^e = \chi_{\perp}^i = 2.0\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\kappa_{\parallel}$  : classical  
**Eirene Monte Carlo code for neutrals :  $D$ ,  $D_2$ ,  $C$**

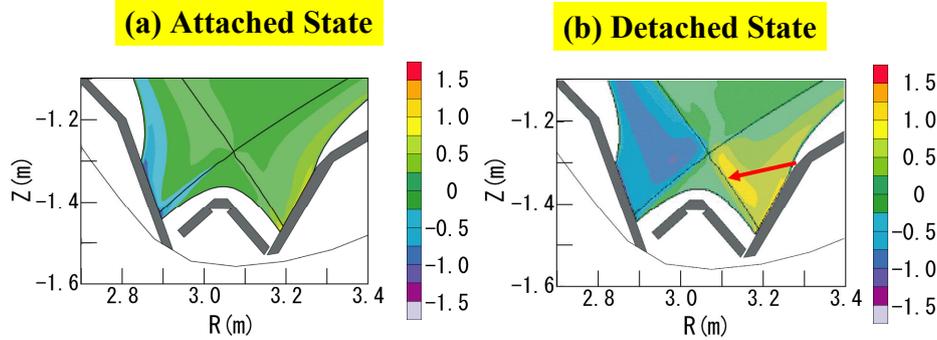


Fig. 7 2D-profile of parallel Mach number ( $M=u_{\parallel}/C_s$ )

The spatial  $M$ -profiles are compared between  
 (a) attached plasma case :  $n_D=1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  and  
 (b) detached plasma case :  $n_D=2.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ .  
 For both cases, the total input power :  $P_{\text{in}}=2.5 \text{MW}$ .

A.Hatayama,et al.: IAEA 2002

## Comparison with the experiments

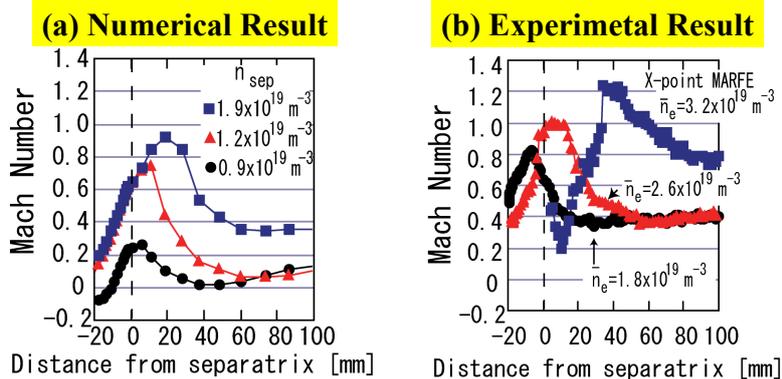
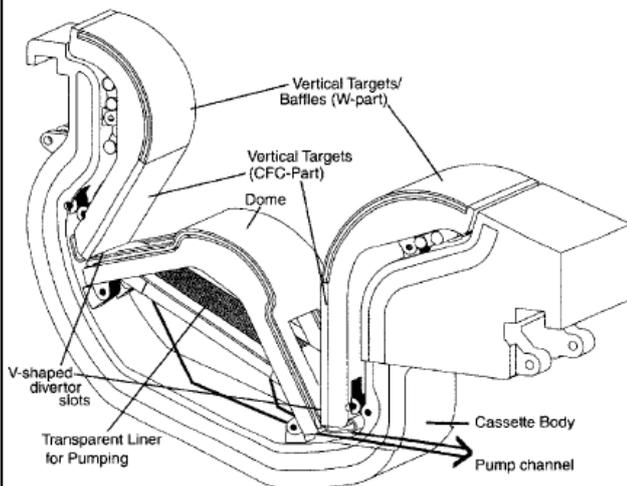


Fig.16 Comparisons of radial  $M$ -profiles

### ● Interesting Common Features

- 1) As the separatrix electron density  $n_{\text{sep}}$  at the mid-plane increases, the Mach number becomes larger,
- 2) Mach number first starts increasing near the separatrix and then the peak moves radially outward, and finally
- 3) the peak value becomes quite large ( $M \sim 1$ ).

## ITERのダイバータ設計とモデリング



\*G.Janeschitz, et al: N.F. 42(2002)14.

Peak power load:

$$q_{pk} < 10 \text{ MW/m}^2$$

DT-particle throughput:

$$\Gamma_{DT} < 200 \text{ Pam}^3/\text{s}$$

$$(1.1 \times 10^{23} \text{ s}^{-1})$$

Core fueling:

$$0 < \Gamma_{DT} \leq 50 \text{ Pam}^3/\text{s}$$

Upstream plasma density:

$$n_s \approx 0.33 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

He concentration in the core plasma:

$$c_{He} \leq 6\%$$

Zeff in the core plasma:

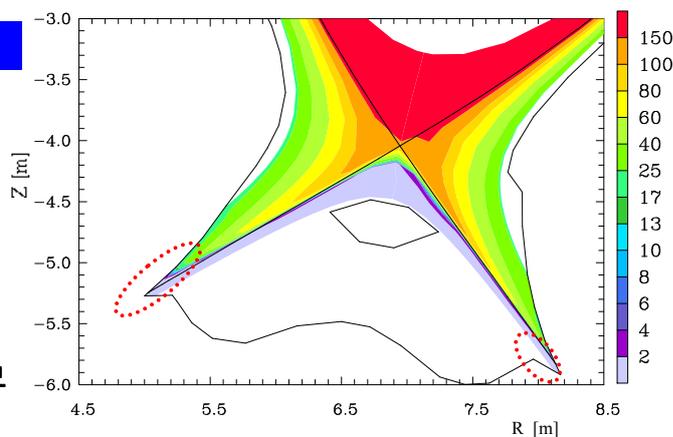
$$Z_{eff} \leq 1.6$$

## ITERのB2-EIRINE予測シミュレーション(EDAの初期)

### 原子・分子データの重要性

\*G.Kukushkin, et al: N.F. 39(1999)2391.

### 電子温度分布



V字型構造による  
中性粒子圧力上昇

部分デタッチメント:  
Separatrix 近傍に 低温 ( $T_e \sim 1\text{eV}$ ) デタッチ領域

## ITERの予測シミュレーション(最近)

### モデルの詳細化による予測精度向上:

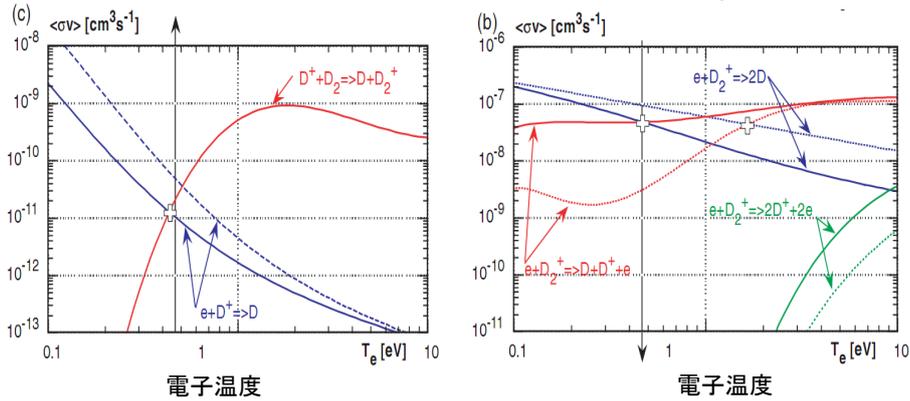
\*A.Kukushkin, et al:

N.F. 42(2002)187, 43(2003)716, N.F. 45(2005) 608.

### とくに原子・分子過程 と 中性粒子輸送:

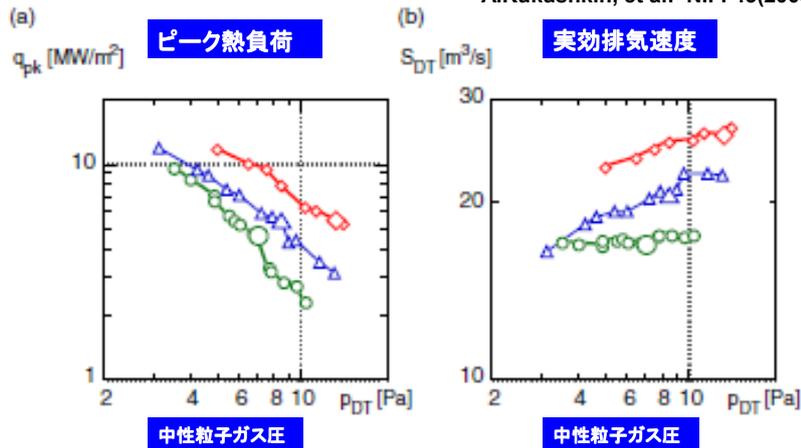
中性粒子-中性粒子衝突効果、

分子活性化再結合 (Molecular Activated Recombination.)



## ITERの予測シミュレーション (Improved Neutral Model)

\*A.Kukushkin, et al: N.F. 45(2005) 608.



- 従来のモデルによる計算 (現在一般的に用いられている中性粒子輸送モデル)
- ▲ 中性粒子-中性粒子衝突を考慮した計算
- ◆ 分子反応過程を詳細化した計算

## 高Z不純物輸送コード開発の意義と開発ステップ

13

現状の炭素材ダイバータの延長線上で、原型炉設計はあり得るのか？

早い段階からの開発着手、モデル検証と  
ITER-BA CSC大型計算機での大規模予測シミュレーション

### 開発ステップ

第1段階：2007年度

高Z不純物の有限ラーマ半径効果及び実磁場配位を考慮した  
不純物モンテカルロ輸送モデル（IMPGYROコード）をベースに  
EDDYコードとの結合によるプラズマ-壁相互作用モデルの高度化、詳細化  
⇒ IMPGYRO + EDDY /PCクラスター上での並列化/高速化

2段階：2008年度-2009年度

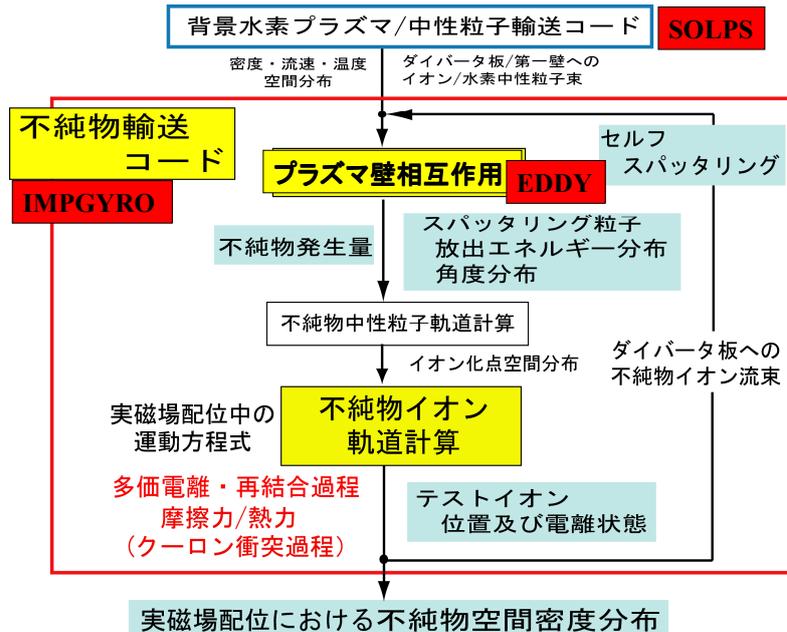
既存の背景プラズマ流体輸送コード（SOLPS）との結合による  
ダイバータプラズマの総合的モデル構築  
⇒ IMPGYRO + EDDY + SOLPS (and SONIC)

第3段階：2008年度-2009年度

JT-60U、ASDEX-Uなど実験との比較によるコード物理モデル  
の妥当性検討、改良

## IMPGYROコード概要

14



## Multi-step Ionization / Recombination processes

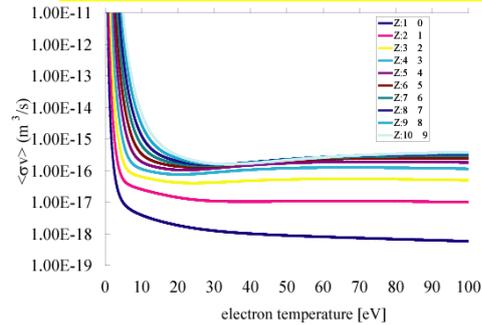
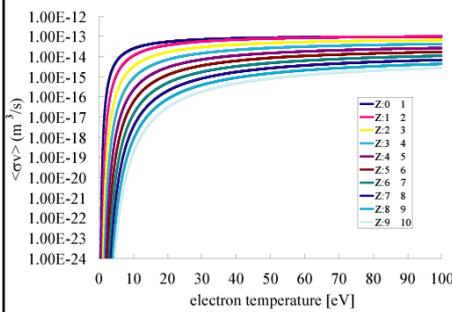
To speed-up the numerical calculation, an **Implicit Monte-Carlo Method** is used. The **transition probability  $P$**  from the  $k$ -th charge state to the  $k'$ -th charge state between time step  $\Delta t$  is obtained by solving the **rate equations** for each cell:

$$\frac{dn_k}{dt} = v_{k-1}^i n_{k-1} - (v_k^i + v_k^r) n_k + v_{k+1}^r n_{k+1}$$

$$\rightarrow P_{k' \rightarrow k}(t + \Delta t) = n_k(t + \Delta t) / n(t + \Delta t)$$

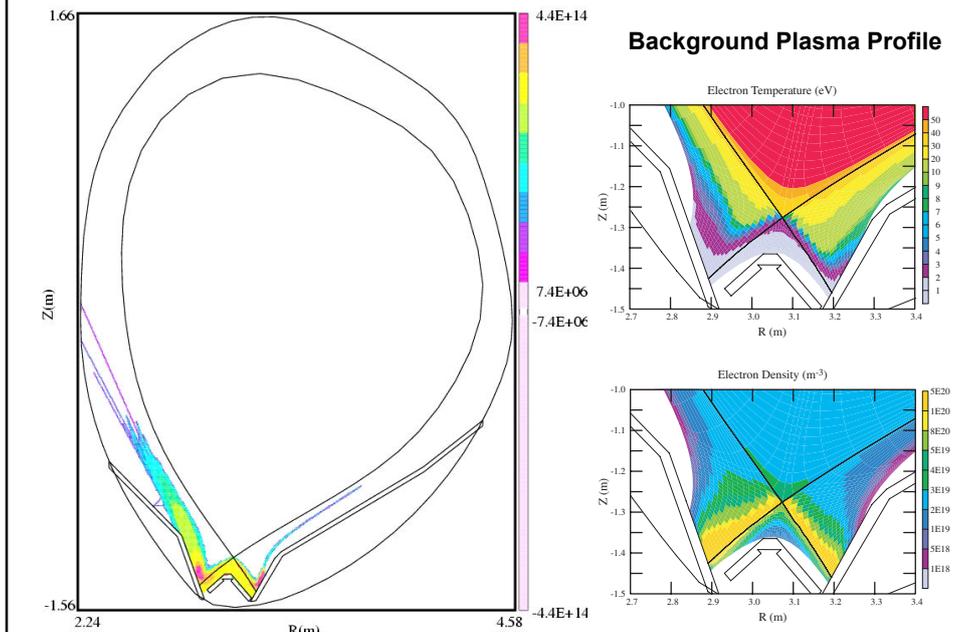
$n_k$  : density for the  $k$ -th charge state

$v_{k'}^i, v_k^r$  : ionization / recombination coefficients for tungsten

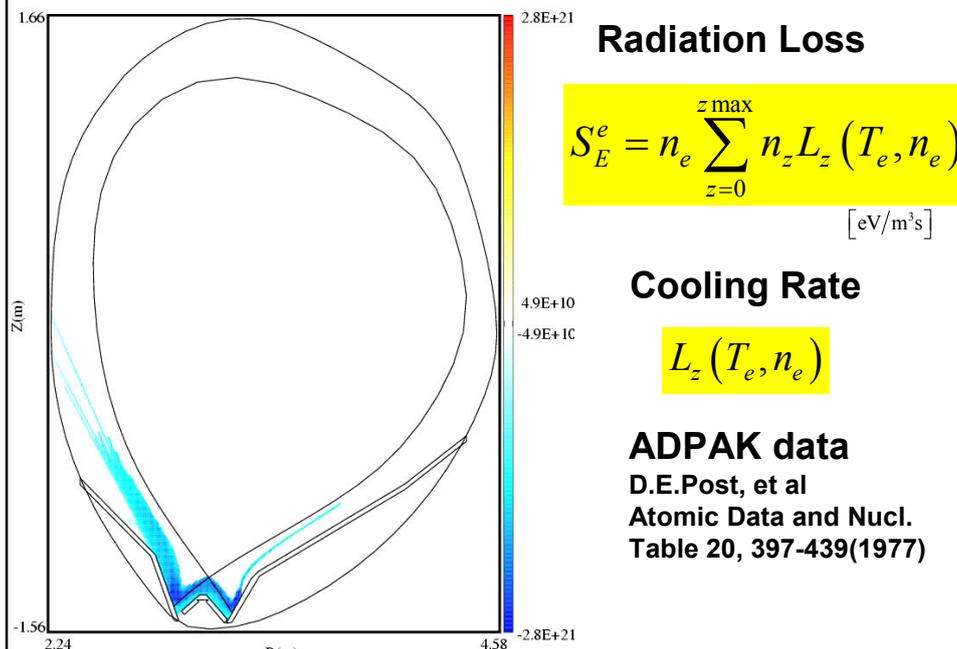


K. Asmussen, *et al.*, Nucl. Fusion **38** (1998) 967.

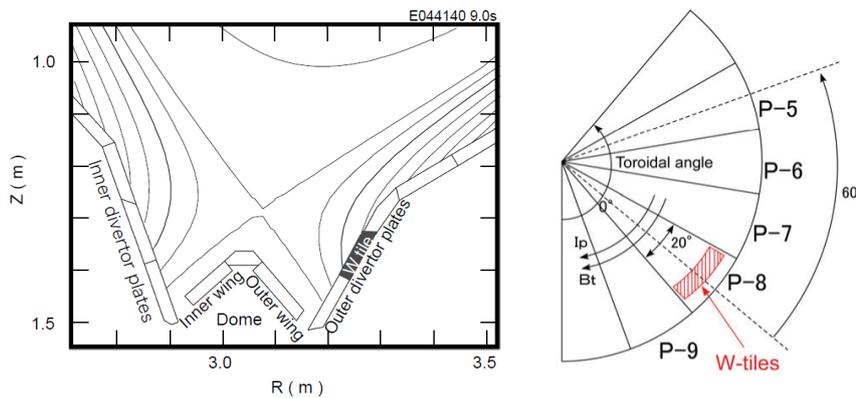
## Initial Test Calculation After IMPGRO-EDDY Coupling (1)



### Initial Test Calculation After IMPGRO-EDDY Coupling (3)



### Code Validation by JT-60U experiments (K.Hoshino, et al)

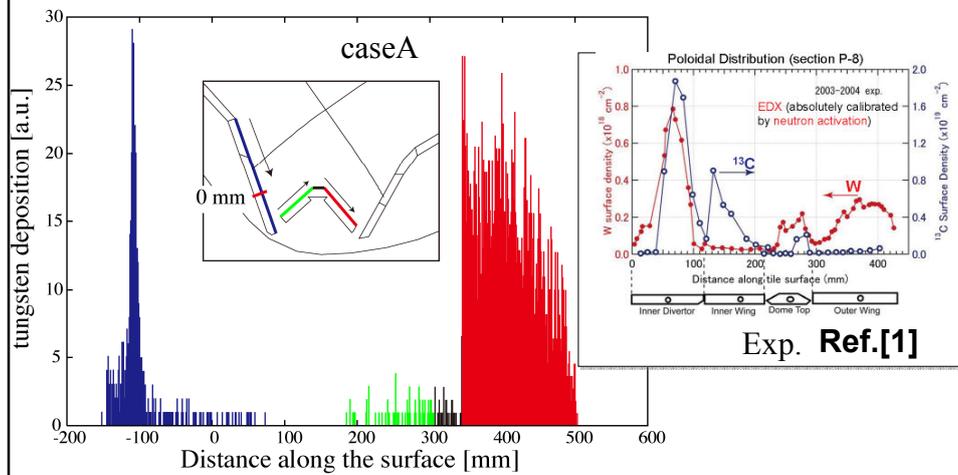


**Fig.1 Location of tungsten tile in JT-60U[1]**

- Tungsten tile was installed on upper part of the outer divertor plate. In the toroidal direction, tiles cover about 17 degree in P-8 section.
- To investigate tungsten transport, the strike point was moved onto the W tile in some shots.

( 25/1003 for 2003-2004, 21/1540 for 2005-2006 )

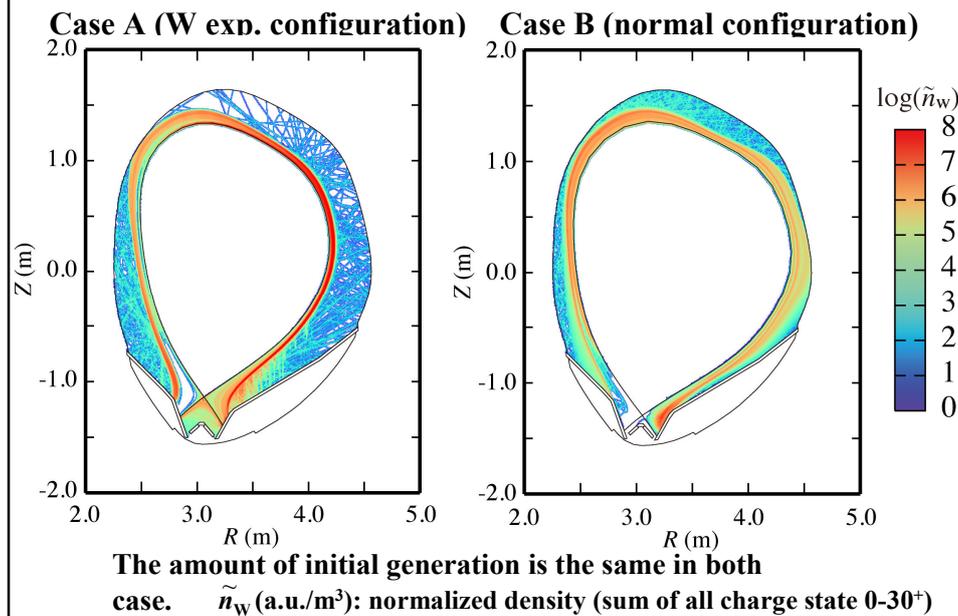
## Poloidal distribution of deposition



As the first step of the code validation, encouraging results have been obtained. More detailed and quantitative comparison is now under way.

[1] Y. Ueda, et al., in Proc. 22nd IAEA-FEC, Geneva, Oct. 2008.

## 2D profiles of W density



- 初期解析では、磁場配位の違いに着目した解析を行い、

- **W実験配位時にプライベート領域で発生したタングステンの輸送が 実験で得られるようなドームトップ、ドーム外側ウィング 堆積分布の原因になり得ることを示した**

- 一方、**内側ダイバータ板**における堆積分布については、**実験と比較的大きな相違**

今後、この**初期解析では考慮していない以下の効果を検討**

- (1) 背景プラズマ条件による輸送過程の変化
- (2) コア領域を通しての大域的輸送
- (3) プラズマ-壁相互作用(EDDY : Switch-On)
- (4) 堆積したタングステンの再スパッタリングの効果 など

- さらに、**原子分子データベースの収集/評価が不可欠**

## 今後、何をすべきか？

### プラズマ輸送

輸送係数(乱流輸送, Blob, ...)

ドリフトとSOL電流(流れの構造の理解、内外非対称性, ...)

運動論的効果/非平衡性(ELM、シーズ, ...)

**高Z不純物輸送 (多価電離、再結合、放射損失...)**

...

### 中性粒子輸送

**原子・分子データベースの整備 - モデリングに即したデータベースの整備 -**

分子活性化再結合(デタッチプラズマの更なる理解)

重金属不純物 多価電離、励起、再結合過程(壁材の選択とリンク)

...

水素原子分子と固体表面相互作用(表面再結合及び放出過程)

中性粒子-中性粒子衝突のモデル化

...

### 表面相互作用/材料

## まとめ

---

- 実験炉、原型炉設計において、ダイバータ設計の成立性は、炉の成立性そのものを左右する。
- 信頼性の高い、境界層プラズマシミュレーションコードの開発が強く望まれる。
- 信頼性の高いシミュレーションコード開発にとって、原子・分子データ及びその評価が不可欠。  
(ex. ITER設計におけるB2-EIRINEによるモデリング)
- 単にデータの提供だけではなく、**コード開発への原子・分子エキスパートの参加が必要**。
- **ダイバータシミュレーションモデル/コード開発**では、**プラズマ、原子分子、壁相互作用、など幅広い分野の垣根を越えた協力、連携が不可欠!**