

過渡状態のダイバータプラズマに対する原子・分子過程シミュレーション

第14回若手科学者によるプラズマ研究会
於) 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所
2011年3月7 - 9日

慶應義塾大学大学院 理工学研究科
畑山研究室 修士課程2年
柴田 崇統

研究目的

ELM時のダイバータプラズマの挙動理解

ELMによるダイバータ領域への高エネルギープラズマ粒子入射

- ・非平衡時におけるシースポテンシャルの変化
- ・高エネルギー粒子入射

非平衡プラズマ、及び励起水素原子の挙動を同時に模擬する
シミュレーションモデルを構築する

励起水素原子-プラズマ間相互作用

ELM時にダイバータ領域で生じる物理過程を理解

何電交換によるイオンフラックス緩和

測定可能な結果から、ELM時におけるEEDFを予想することは出来ないか？

研究手法(1) ELM時の計算モデル提案

新たな計算モデルに必要な効果

PICモデル[2] (プラズマ計算)

- ・ELM時の非平衡プラズマの挙動
- ・ポテンシャル分布の時間変化

CRモデル[3] (水素原子密度計算)

- ・励起準位の水素原子密度計算

- ・非平衡プラズマ-励起水素原子間相互作用

- ① PIC (Particle-In-Cell) モデルと
- ② CR (Collisional-Radiative) モデルのカップリング

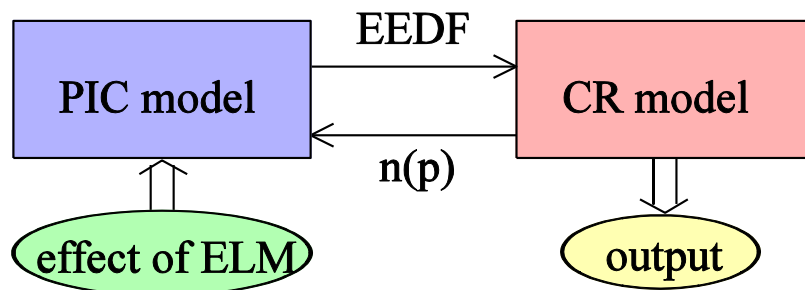


Fig.3 Concept of the present model.

ELM時の非平衡性を考慮した励起準位密度(H_{α} 線発光強度)の時間発展を計算可能

- [2] T.Takizuka *et al.*, Nucl.Fusion **49**, 075038 (2009)
[3] K.Sawada *et al.*, Phys. Rev. E **49**, 5565 (1993)

研究手法(2) PIC (Particle-In-Cell) モデル

①運動方程式

$$m_j \frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v}_j \times \mathbf{B})$$

($j = \text{electron or H}^+$)



- ・Leap-frog法を用いて計算
- ・電場は系のポテンシャル分布から計算
- ・外部磁場は一定

②Poisson方程式

$$\Delta\phi = -\rho/\epsilon_0, \quad \mathbf{E} = -\nabla\phi$$



- ・空間電荷位置から電荷密度分布を計算
- ・TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)法によるポテンシャル計算

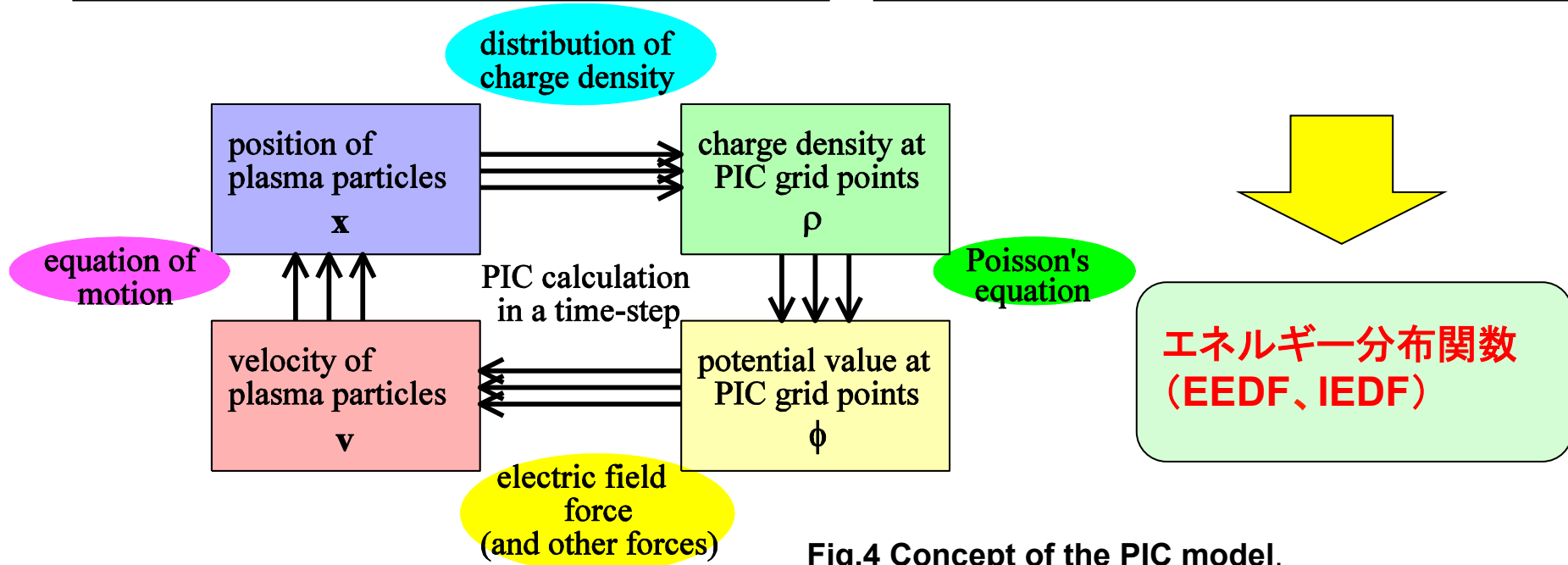


Fig.4 Concept of the PIC model.

研究手法(3) 励起水素原子密度の計算

・CR (Collisional Radiative) モデル

③ レート方程式

$$\begin{aligned}
 dn(p)/dt = & \left[\left\{ \sum_{q < p} C(q, p) + \sum_{q > p} F(q, p) \right\} n_e + \sum_{q > p} A(q, p) \right] n(q) \\
 & - \left[\left\{ \sum_{q > p} C(p, q) + \sum_{q < p} F(p, q) + S(p) \right\} n_e + \sum_{q < p} A(p, q) \right] n(p) \\
 & + (\alpha(p)n_e + \beta(p))n_en_i
 \end{aligned}$$

レート係数

$$C = \langle \sigma v \rangle = \int \sigma(E)v(E)f(E)dE$$

代入

PICモデルより得られるEEDF

考慮される原子過程

C, F, S, A, α, β

電子衝突励起・脱励起
電子衝突電離
自然放出過程

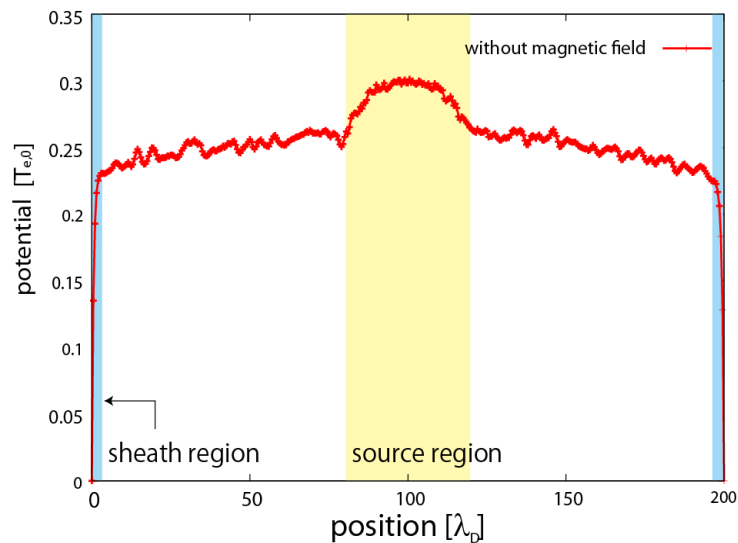
not included

三体再結合・輻射再結合

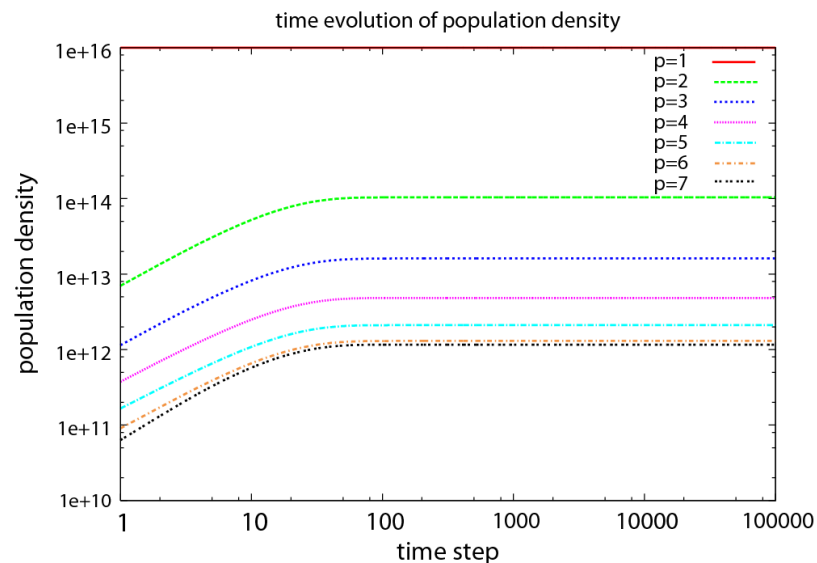
・励起水素原子密度 $n(p)$ の時間発展を計算可能

・実験結果 (H_α 線) と比較

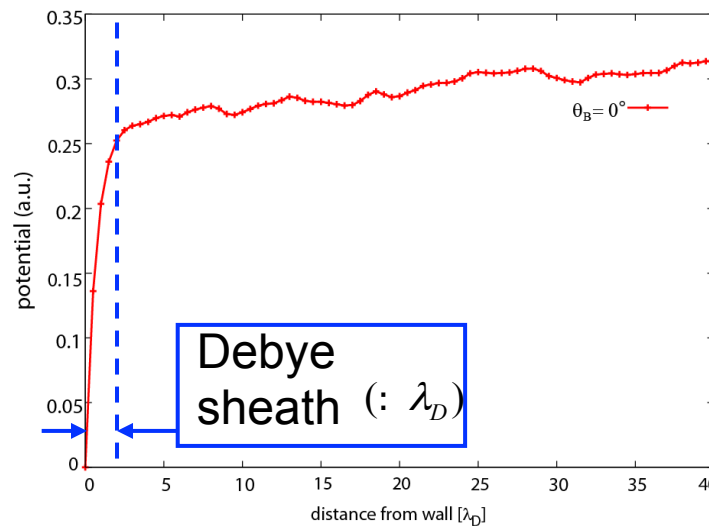
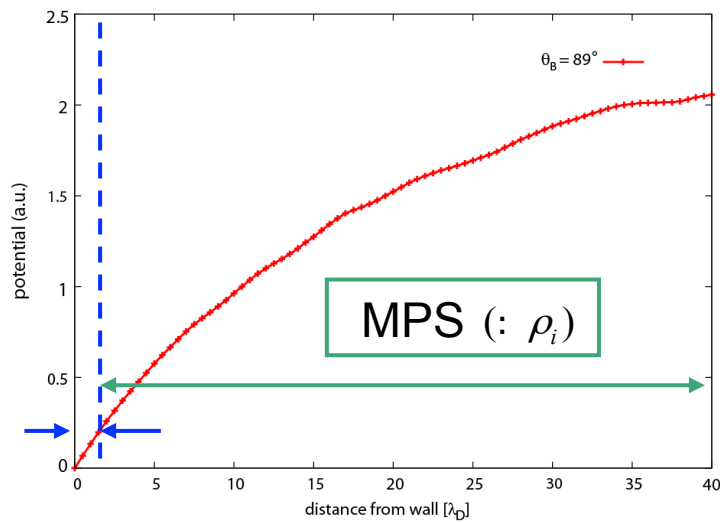
研究手法(4) 計算モデルの妥当性検証



① Debyeシースの確認



③ CRモデル妥当性検証



② Magnetic Pre-Sheathの磁場依存性とサイズの確認

妥当性検証(1) Debyeシースの形成確認

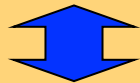
・Debyeシースの形成

計算結果の確認方法

・ポテンシャルドロップの比較

理論値

$$\Delta\phi = (k_B T_e / 2e) \ln(2\pi m_i / m_e) : 3k_B T_e / e$$



計算結果 (Fig.5)

計算条件

- ・ソース領域より、**定常的に電子・イオンを入射** (初期速度分布はMaxwellian)
- ・壁位置でプラズマ粒子消滅
- ・壁ポテンシャルは $\phi = 0$
- ・磁場 $B=0$ (稲森[3]と同条件)
- ・PICによるx軸方向電場計算

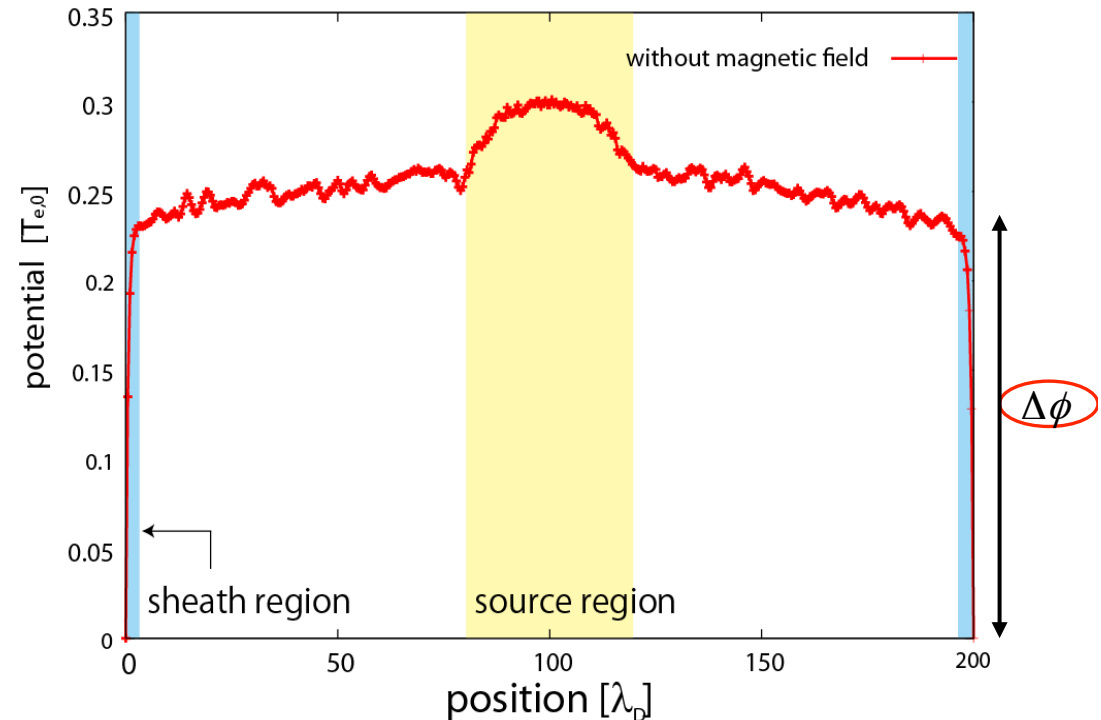


Fig.5 Calculation of the sheath drop with no magnetic field.

- ・計算によるポテンシャルドロップは理論値と比較して10分の1程度
- ⇒PARASOL[4]による計算結果と定性的に同様の結果

[4]「PARASOLコードの開発」、細川哲成、滝塚知典、日本原子力研究所 (2000)

妥当性検証(2) MPSの再現、磁場依存性の理解

・Magnetic Pre-Sheath (MPS) の再現

磁場中におけるダイバータプラズマ
⇒Magnetic Pre-Sheath領域の形成

磁束密度 B と電場 E の成す角度 θ_B に依存

$\theta_B = 0^\circ$: normal Debye sheath

$\theta_B \approx 90^\circ$: strong oblique sheath

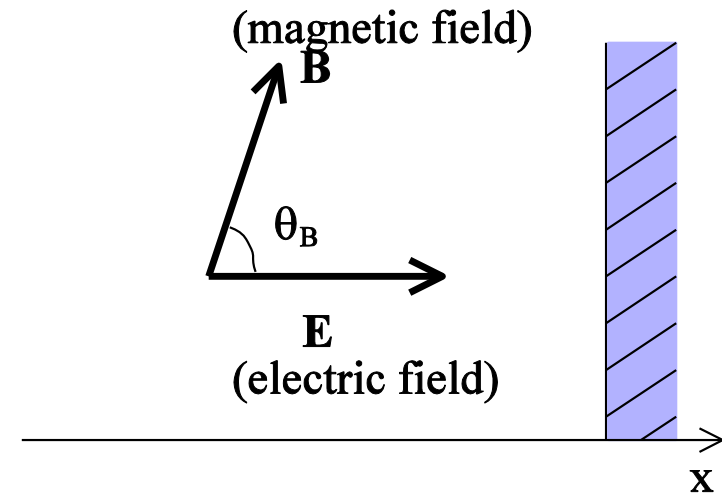
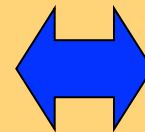


Fig.6 Angle between magnetic field and electric field.

計算結果の確認方法

・MPS領域幅 ⇒ イオンのLarmor半径程度
B=0.01Tの磁場中

$$\rho_{i,scaled} = m_i v_i / eB : 9.60 \times 10^{-5} \text{ m}$$



計算結果(Fig.7)

・ $\theta_B = 89^\circ, \theta_B = 0^\circ$ の各々に対し、ダイバータ壁付近のポテンシャル外形をプロット

- ・MPS領域のサイズから計算モデル妥当性検証 ⇒ ($\sim \rho_i$)となっているか？
- ・MPS効果の角度 θ_B 依存性をシミュレーションより検討

妥当性検証(2) MPSの再現、磁場依存性の理解

▪ Magnetic Pre-Sheath (MPS) の再現

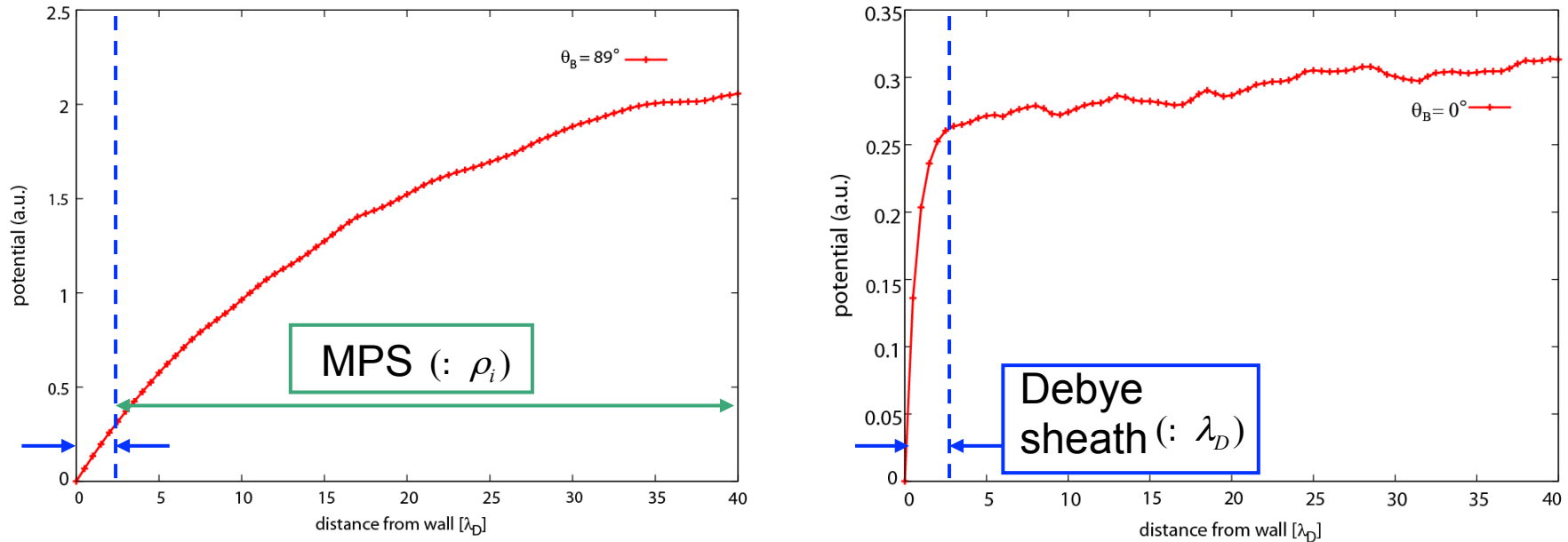


Fig.7 Comparison between the potential profile in the case $\theta_B=89^\circ$ and $\theta_B=0^\circ$.

1. MPS領域のサイズ:

計算条件 $T_e=10\text{eV}$, $n_e=10^{19}\text{m}^{-3}$ の下では、 $\rho_i \sim 10\lambda_D$

\Rightarrow MPS領域の計算結果 $30 \sim 40\lambda_D = 3 \sim 4\rho_i$

個々の粒子に対する
自己矛盾の無い計算から、
理論的なMPS領域を再現

2. MPSの磁場角度依存性:

θ_B の値を変化させ、MPSの形成を各々計算
($\theta_B = 89^\circ, 80^\circ, 45^\circ, 0^\circ$)

高角度における強いMPS効果
を確認 ($\theta_B \geq 80^\circ$)

妥当性検証(3) 定常状態における励起水素原子密度

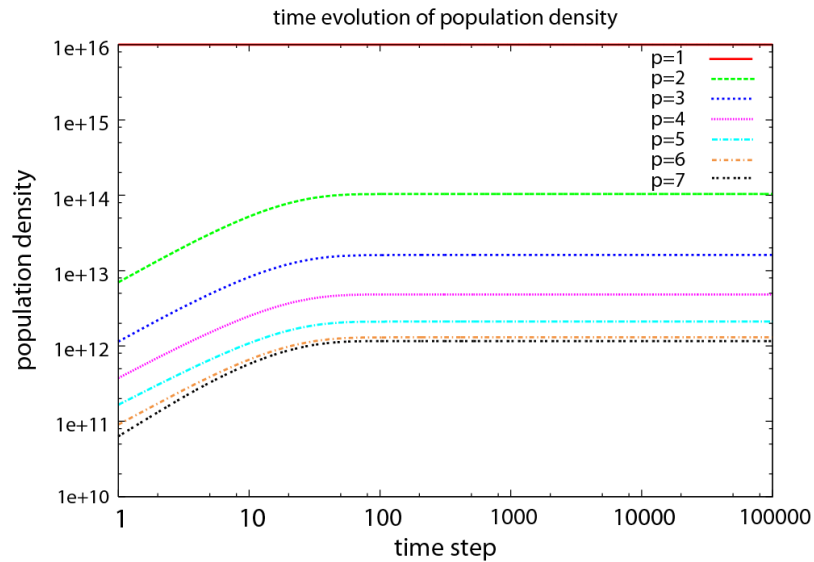


Fig.A Time variation of population density calculated in the present model

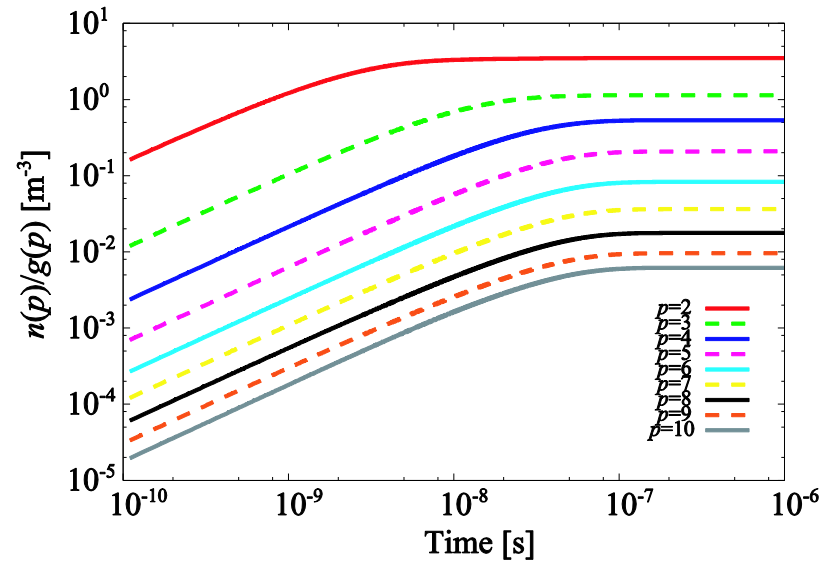


Fig.B Time variation of population density calculated by INAMORI [5]

先行研究と同様の条件で計算、比較

⇒ 定常状態の励起水素原子分布を計算

計算条件 $\Delta t = 6.7 \times 10^{-9}$ sec

$T_e = 10$ eV, $n_e = 10^{19} / \text{m}^3$

初期条件 $n(1) = 10^{16} / \text{m}^3$, $n(p) = 0$

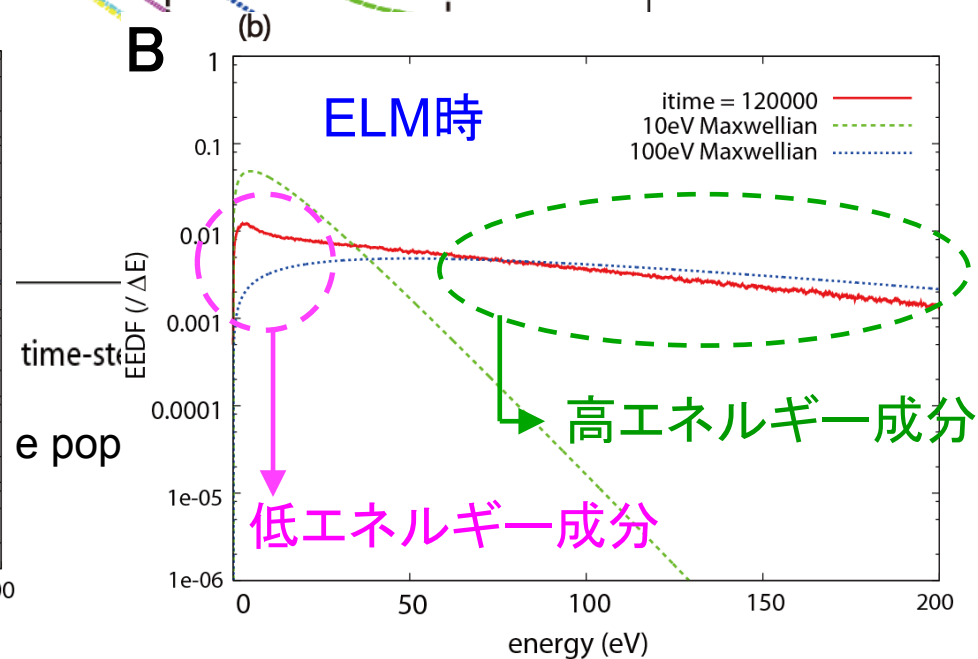
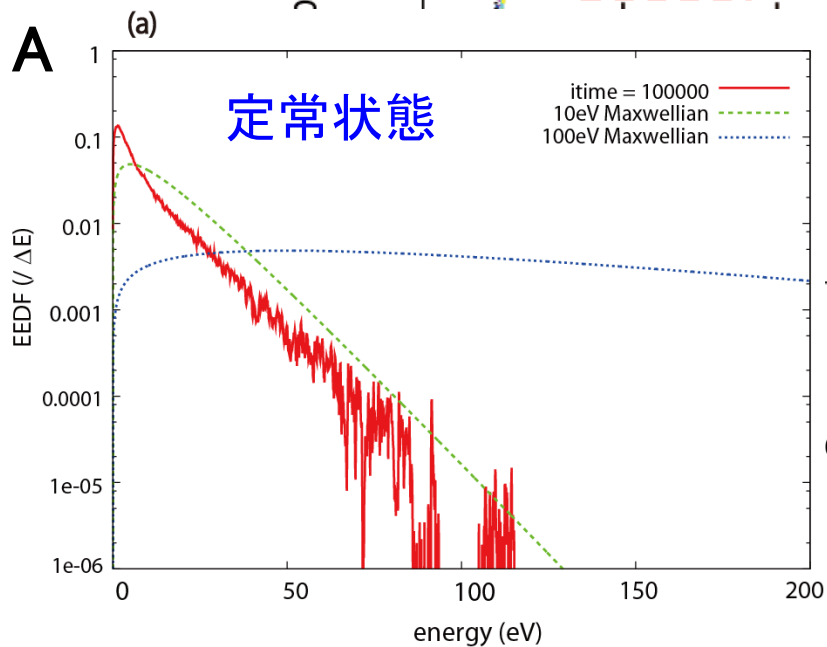
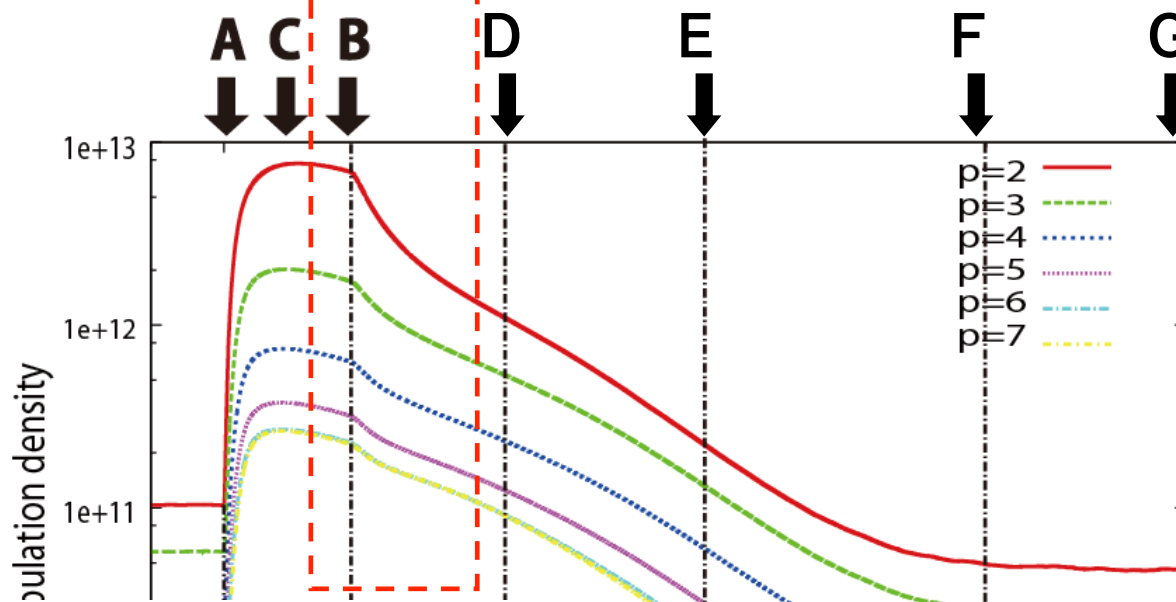
電子衝突励起・脱励起, 電子衝突電離,
自然放出過程を考慮



同様の緩和時間を実現

($\tau = 10^{-9} \sim 10^{-8}$ sec)

研究結果① ELM時のダイバータプラズマの理解



研究結果① ELM時のダイバータプラズマの理解

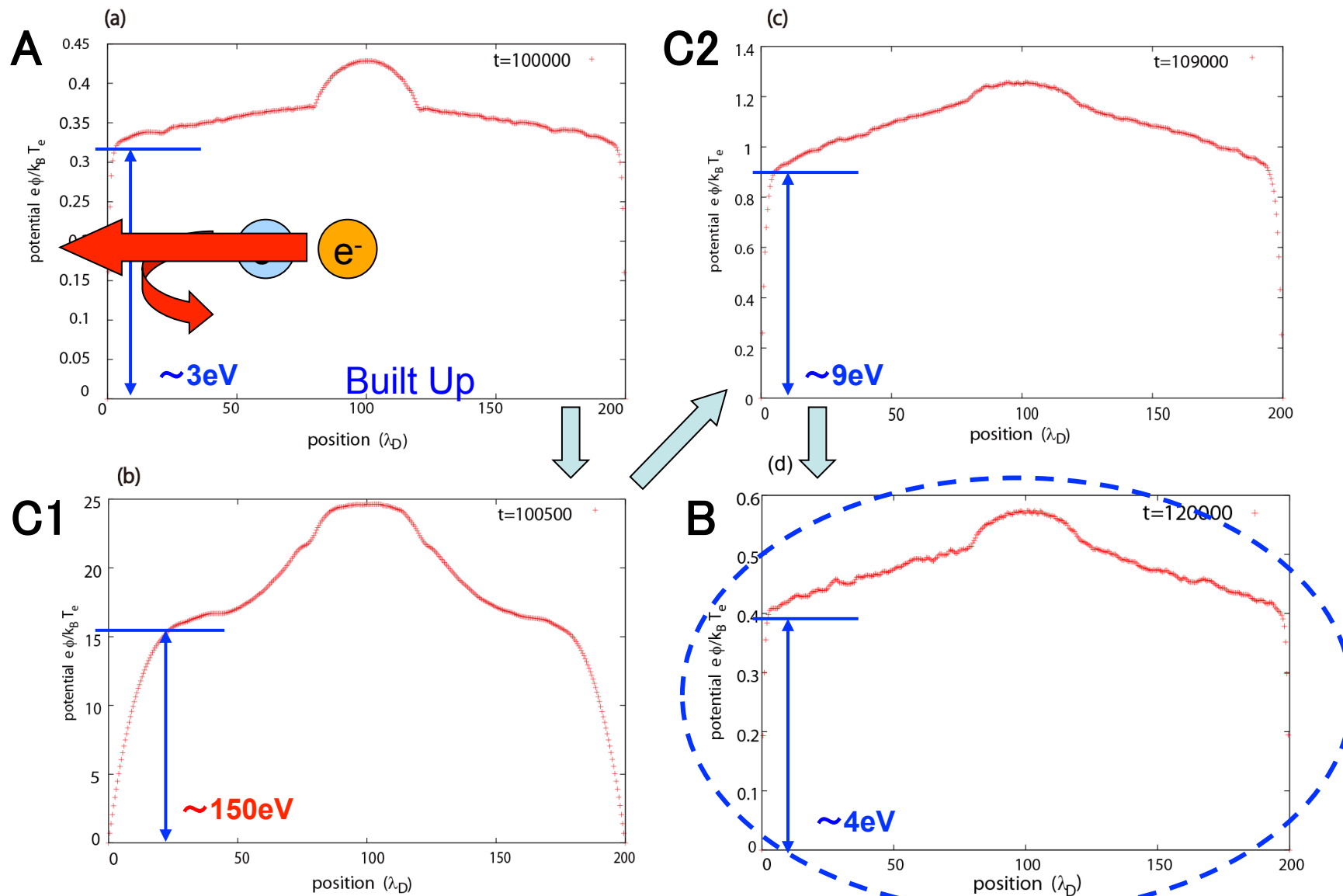
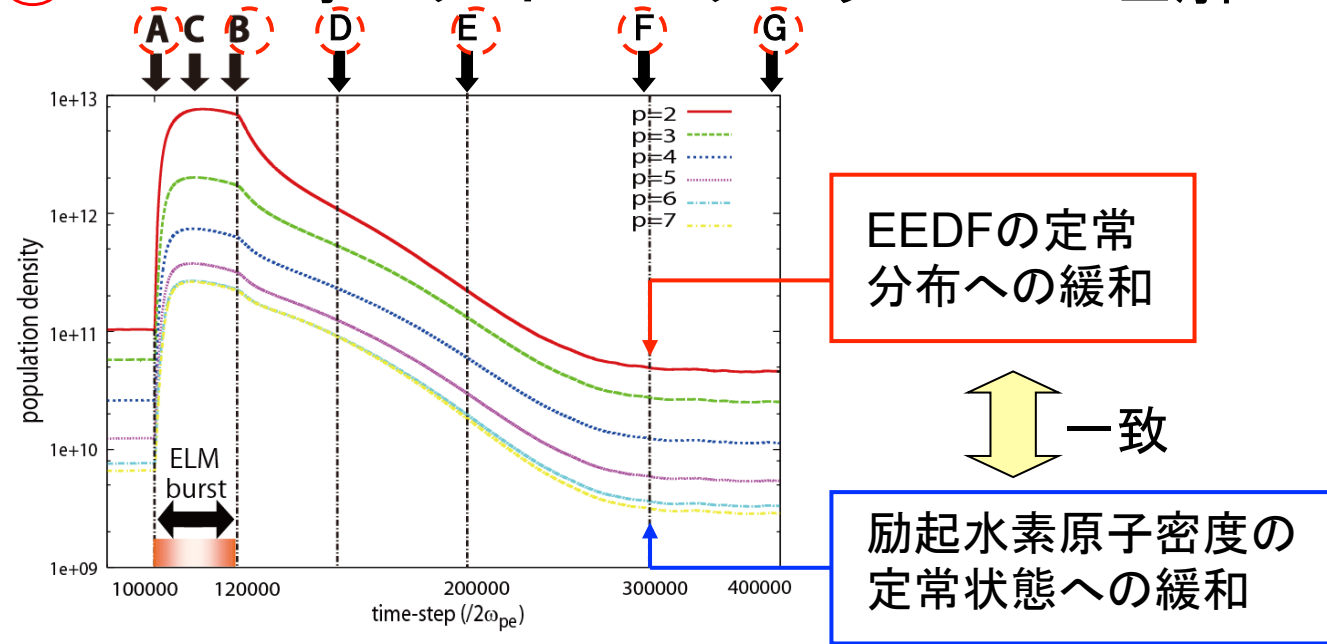


Fig.6 Potential Profiles (Sheath Barrier)

低エネルギー電子のみ反射 ⇒ EEDFの低エネルギー成分増加

研究結果② ELM時のダイバータプラズマの理解



ELM時のEEDFと励起水素原子の時間変化に対する結論

水素原子の密度変化のtime-scale (衝突時間 $\tau \sim 10^{-9}$ sec) は、EEDFの変化のtime-scale (PICによる計算から $\sim 10^{-7}$ sec) と比べて非常に速い事実から説明可能

⇒EEDFの時間変化に対応して励起水素密度が瞬時に変化

結論

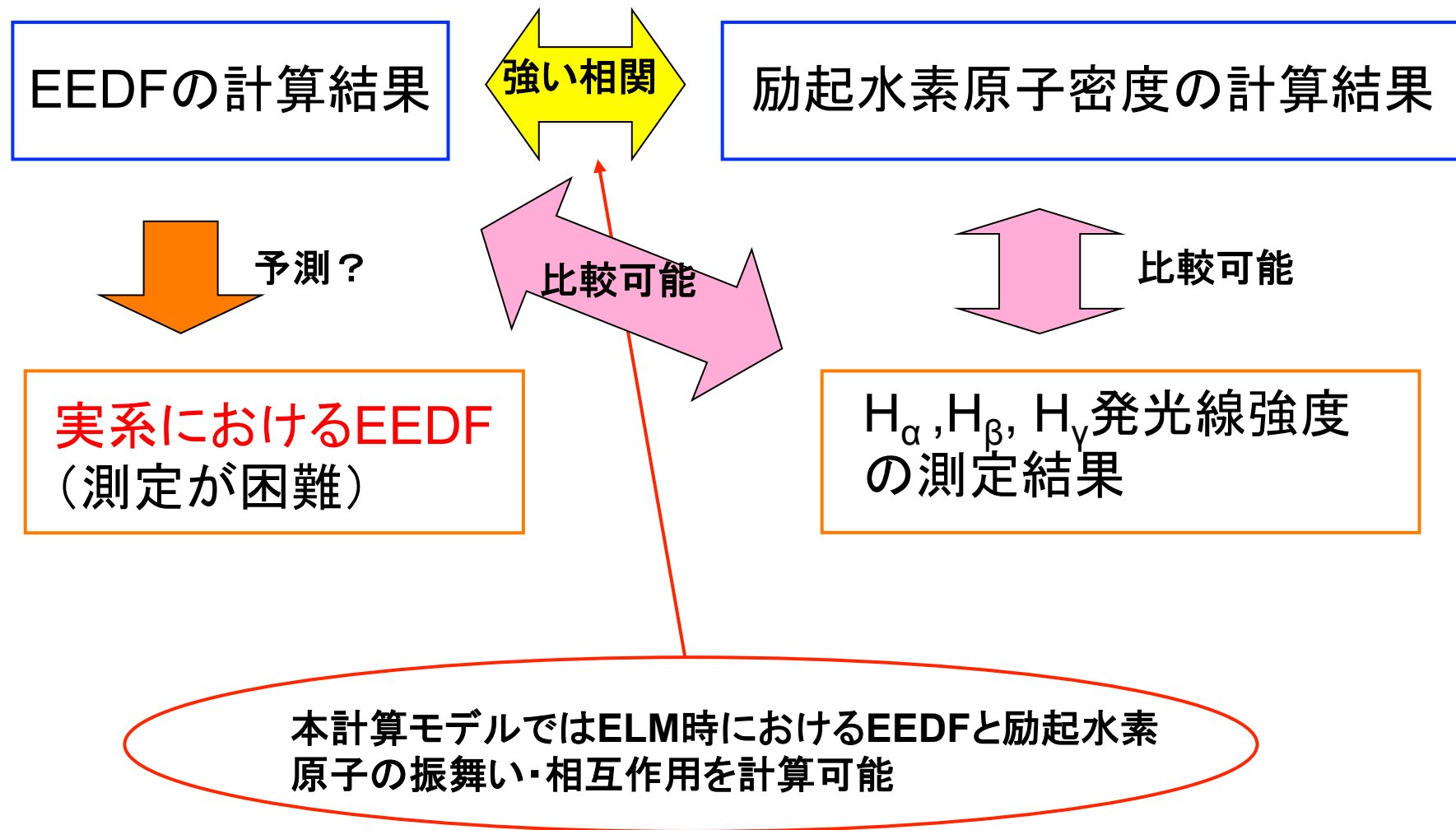
・ELM時の複雑なプラズマ-中性粒子間相互作用を理解する為の新たな数値計算モデル(Dynamic Rate Calculation)が提案された。

①非平衡状態におけるEEDFの非平衡分布
⇒低エネルギー成分に、シースによる反射電子の蓄積が寄与
⇒高エネルギー成分に、ELMによる入射電子が寄与
⇒**非平衡EEDFに二温度分布が現れる**ことが定性的に理解された

②計算結果から測定H_α線の緩和時間と非平衡EEDFのMaxwellianへの緩和時間がほぼ一致する結果が得られ、**励起水素原子密度がEEDFの変化に対して瞬時に決まる性質**が理解できた

③励起原子密度とEEDFの強い関連性から、励起水素原子の発光線強度測定による**実際のEEDF情報の予測**へのモデリング応用

今後の課題：本研究における数値計算モデルの応用



今後の課題：計算モデルの応用

・励起準位 $p=3-5$ は分光測定可能

$$H_\alpha \text{線強度} \propto A(3,2)n(3)$$

$$H_\beta \text{線強度} \propto A(4,2)n(4) \quad \text{※ } A(p,q) \text{ は自然放出係数}$$

$$H_\gamma \text{線強度} \propto A(5,2)n(5)$$



・EEDF計算結果から**実際のEEDF**を予測

定常状態(A)

$$H_\alpha / H_\beta = 1.65 \times H_\beta / H_\gamma$$

平衡Maxwell分布

$$\ln(n(3) / n(4)) \sim 1.06 \times \ln(n(4) / n(5))$$

ELM時(B)

$$H_\alpha / H_\beta = 2.20 \times H_\beta / H_\gamma$$

非平衡EEDF (phase B)

$$\ln(n(3) / n(4)) \sim 1.48 \times \ln(n(4) / n(5))$$

今後、分光測定との比較による**定量的な評価**

ELM時の入射電子エネルギー依存性評価

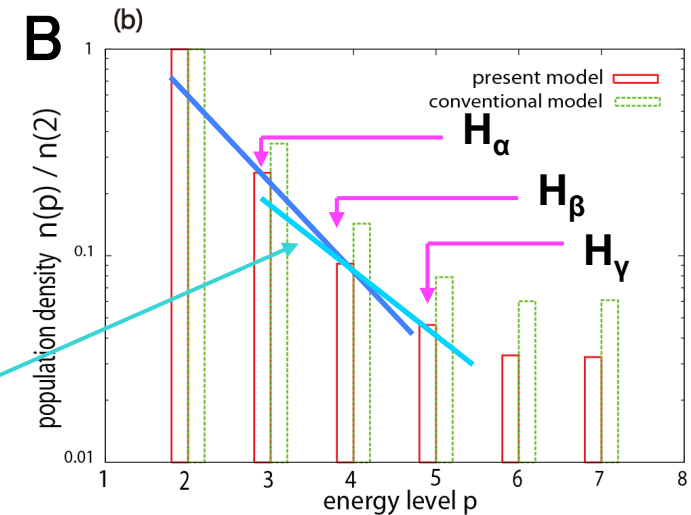
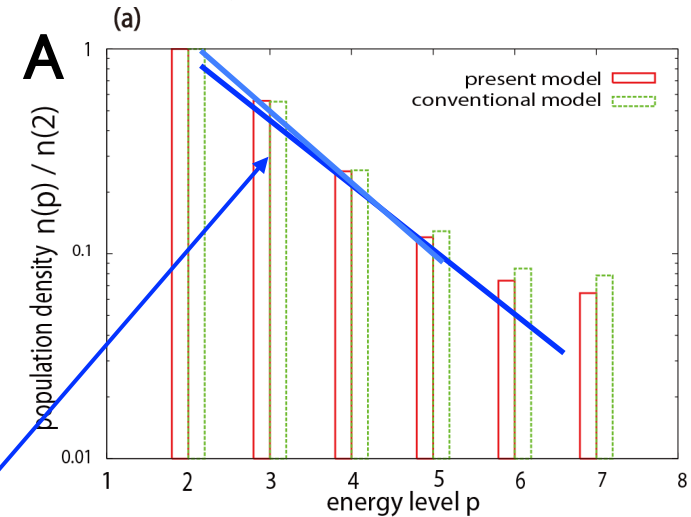


Fig.7 Comparison of the population density distribution by the present mode with the non-equilibrium EEDF (solid box), and the conventional model with Maxwell distribution (dashed box).

今後の課題： 計算モデルの応用

・ELM時の複雑なプラズマ-中性粒子間相互作用を理解する為の新たな数値計算モデル(Dynamic Rate Calculation)が提案された。

③励起原子密度とEEDFの強い関連性から、励起水素原子の発光線強度測定による**実際のEEDF情報の予測**へのモデリング応用

今後の課題

⇒**ELM時のEEDFと、発光線強度**の依存性を理解する為...

1. 非平衡プラズマに対する水素原子発光線強度の測定
2. ELM時の各プラズマ条件に対する励起水素原子密度の計算