

ダイバータプラズマと整合性のとれた 炉心プラズマ燃焼制御の課題

～プラズマ立ち上げ時のH-mode遷移条件とダイバータデタッチ条件～

第9回若手科学者によるプラズマ研究会

日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所 2006年3月15日～17日

(財)電力中央研究所 原子力技術研究所 新型炉領域

日渡 良爾

共同研究者

慶応大学

畑山 明聖

日本原子力研究開発機構 滝塚 知典

東京大学

小川 雄一

発表内容

- 研究背景と動機
 - H-mode遷移条件とダイバータデタッチ条件のトレードオフ関係
- 目的と研究手法
 - 最終的な目的、ツール、物理モデル
- 簡易ダイバータ輸送モデルの開発
 - モデリング現状、2点モデルの開発、モデルの検証
- H-mode遷移モデルの検証作業
 - 輸送コードの改良、検証手法、どのモデルが実験と合う？
- まとめ

研究の背景

中心プラズマ

役割

- エネルギー発生源
- 高いエネルギー増倍係数
- 高い出力密度

高性能プラズマ

- 周辺輸送障壁: H-mode
- 内部輸送障壁: RS放電

遷移への制御条件

- 加熱パワー
- **低密度が遷移し易い**
- etc.

$$P_{th}^{LH} \propto 0.072 |B_{out}|^{0.7} n_{20}^{0.7} S^{0.9}$$

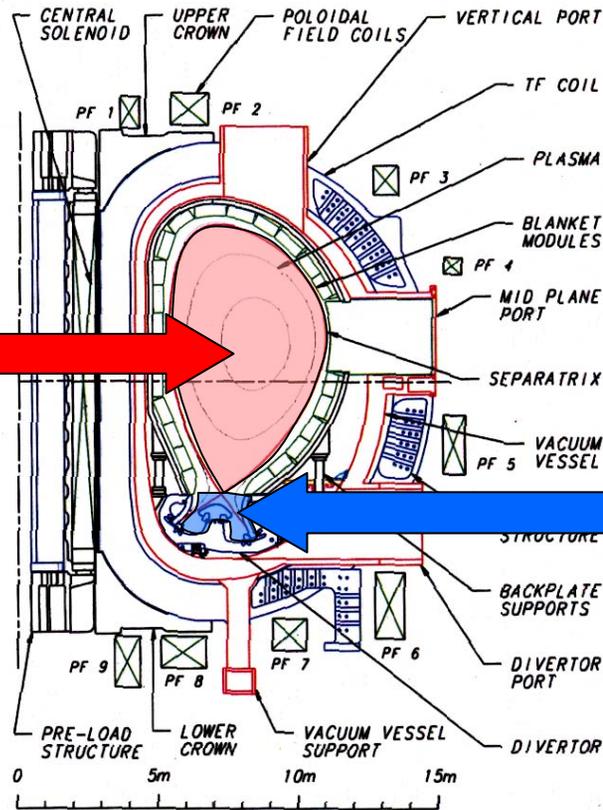


図1. トカマク装置断面

ダイバータプラズマ

役割

- ヘリウム排気
- 除熱(ダイバータ板の保護)

プラズマの状態

- 低リサイクリング状態: ×
- 高リサイクリング状態: ×
- デタッチ(非接触)状態: ○

制御条件

- **高密度が必要**
- 不純物添加
- etc.

両方に整合性の取れたプラズマ燃焼制御が必要

この研究のきっかけ

- 0次元輸送モデルによるITER標準運転の立上げ計算.
- 加熱 (P_{aux}) 開始直後、LH遷移. アルファ加熱 (P_{α}) 開始.
- ダイバータ熱負荷 (q_{div}) の急激な上昇 (LH遷移前の約10倍)

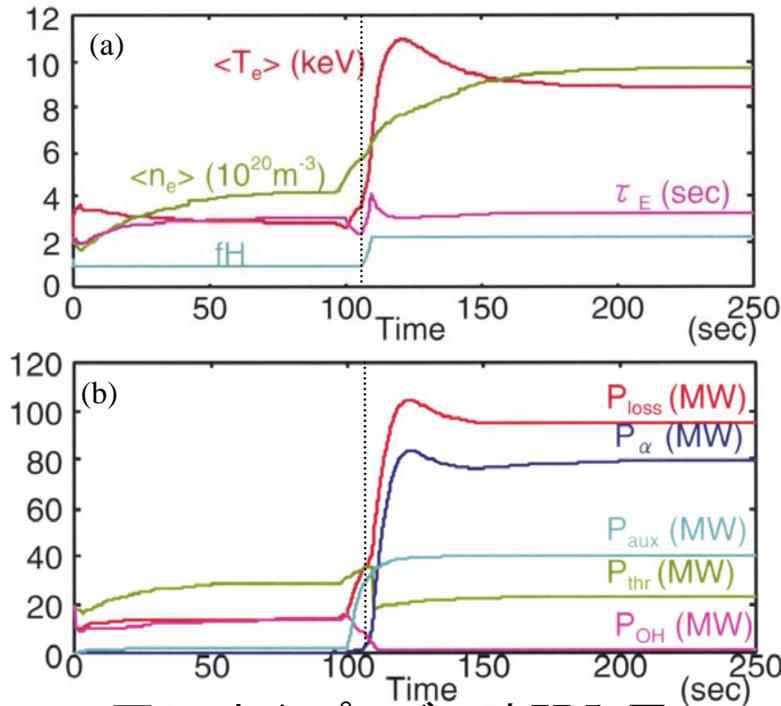


図2. 中心プラズマ時間発展

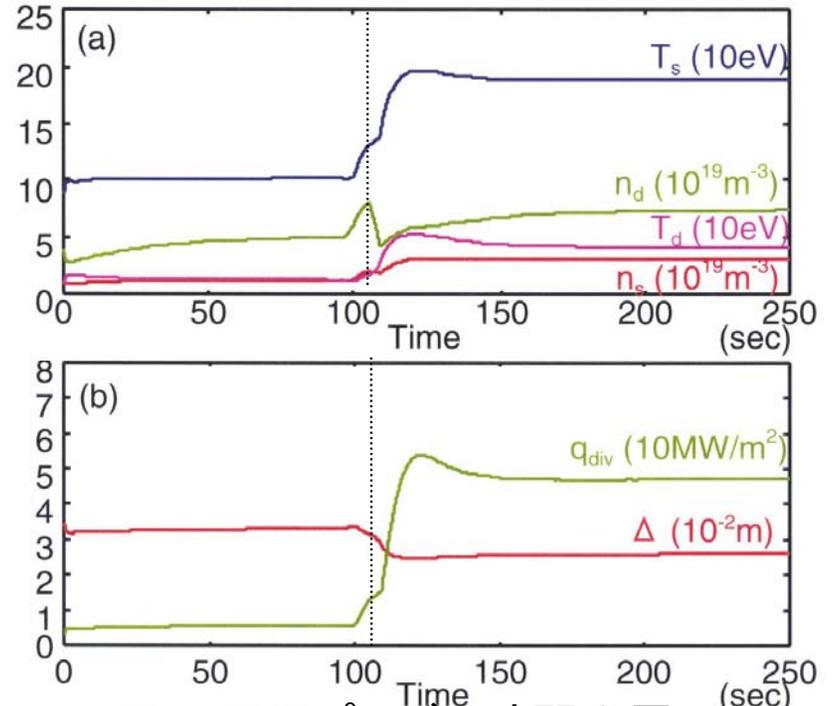


図3. 周辺プラズマ時間発展

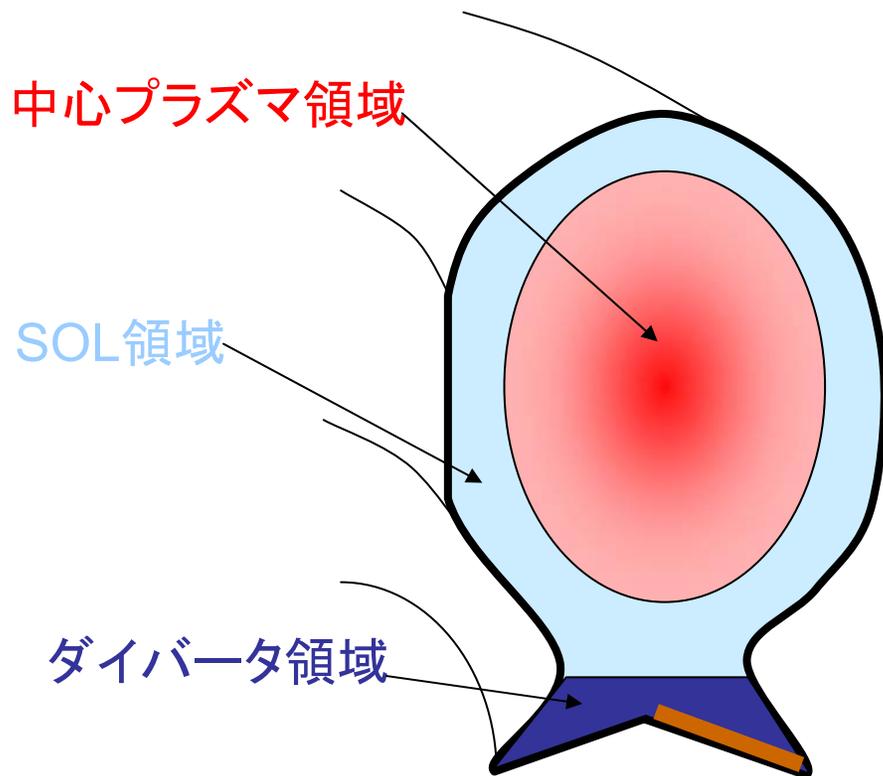
疑問

- いつデタッチ状態を形成するのか、H-mode遷移以前？
- 熱負荷条件が大きく変わってもデタッチ状態を維持可能？
- 適切なプラズマ制御が必要なのでは？

研究の目的

- 燃焼プラズマ立上げ時にプラズマ制御が必要かどうかを明らかにする.
 - H-mode遷移物理モデルの検証作業
 - ダイバータプラズマモデリング
- 必要ならばプラズマ制御指針を明らかにする.

研究手法

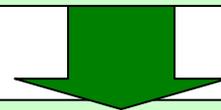


H-mode遷移:

中心プラズマの周辺部分の現象

ダイバータデタッチメント:

ダイバータ領域の現象



中心プラズマ部分の輸送解析コードと
SOL・ダイバータ領域の輸送解析コード
の結合作業が必要

中心プラズマの輸送解析: 1次元プラズマ輸送コードを用いる.

ダイバータプラズマの輸送解析: ダイバータプラズマ2点モデルを用いる

2点モデルと1次元輸送コードの結合

2点モデルと1次元輸送コード結合方法

中心プラズマ輸送モデル

1D プラズマ輸送モデル **combine**

非定常輸送モデル

輸送の時間スケール: sec order

出力パラメータ

- セパトリックス外への熱流速: q_{\perp}
- セパトリックス外への粒子束: Γ_{\perp}

入力パラメータ

- セパトリックス温度: T_s (境界条件)
- セパトリックス密度: n_s (境界条件)

周辺プラズマ輸送モデル

2点モデル

定常輸送モデル

輸送の時間スケール: msec order

入力パラメータ

- セパトリックスからの熱流速: q_{\perp}
- SOL上流の粒子密度: n_s

出力パラメータ

- SOL上流の温度: T_s

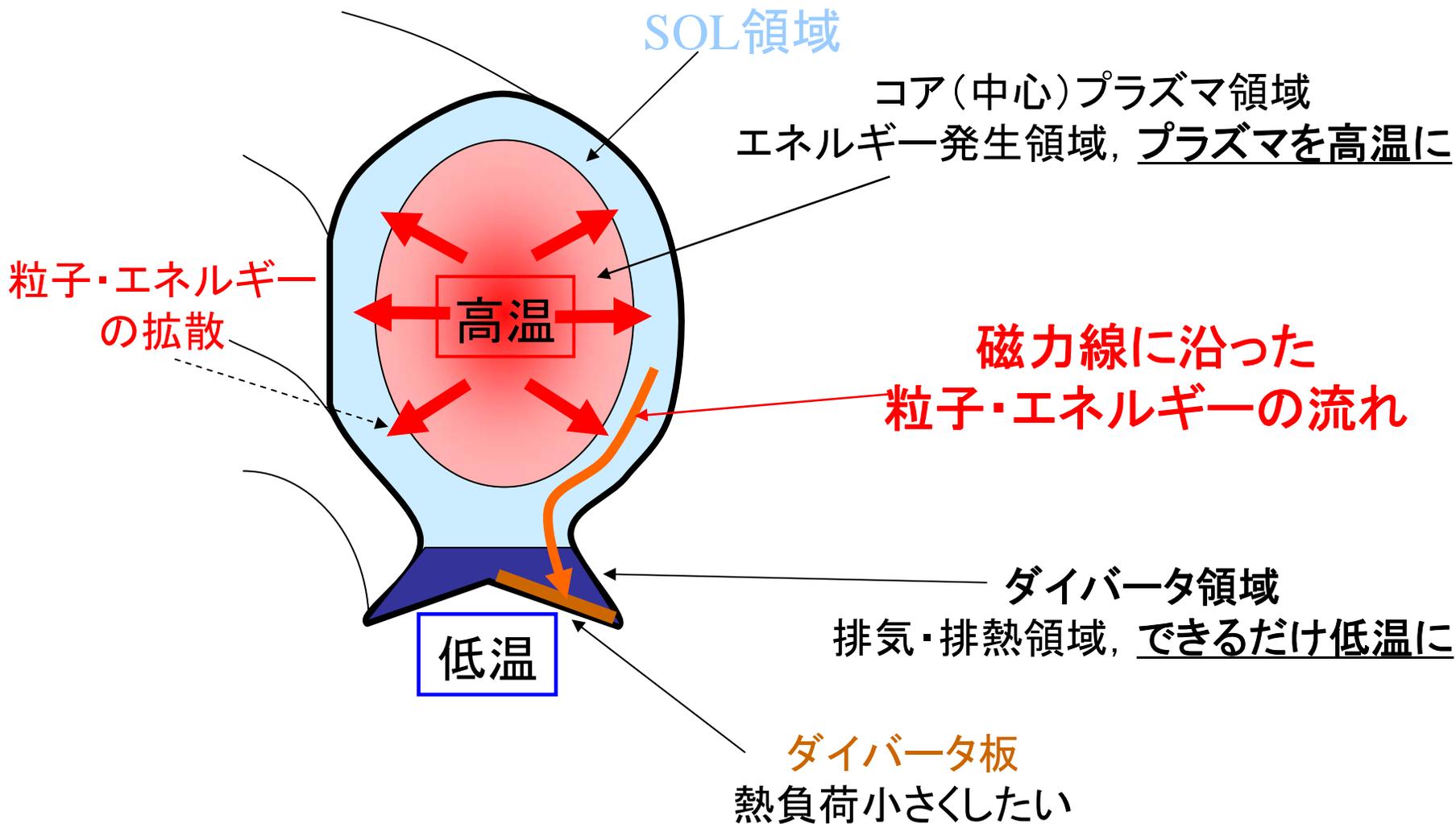


Problem : 粒子束からSOL 上流密度 n_s をどのように導くか?

SOL-Divertor領域の粒子バランスを解く事によってSOL上流密度を求める

ダイバータ2点モデルの改良

粒子・エネルギーの流れについて



2点モデル

●運動量保存

$$(1 - f_{mom}^{div}) n_s T_s = (1 + M_d^2) n_d T_d$$

●SOL領域の磁力線に垂直のエネルギー輸送

$$\Delta = \frac{5}{2} \chi_{\perp} \frac{n_s T_s}{q_{\perp}}$$

●磁力線に沿ったのエネルギー輸送

$$L_d^2 q_{\perp} = \frac{4\kappa_0 \Delta}{49} T^{7/2} \left[1 - \left(\frac{T_d}{T_s} \right)^{7/2} \right]$$

●エネルギー保存式

$$\frac{7}{2} (1 - f_{imp}) L_s q_{\perp} = n_d M_d C_s(T_d) h \Delta [\varepsilon + (\gamma' + M_d^2) T_d]$$

SOLの温度・密度とダイバータの温度・密度の関係が得られる。

入力値: SOL上流密度、中心プラズマからの熱流速

出力値: SOL上流温度、ダイバータ温度・密度

この2点モデルを粒子バランスを導入し、1次元輸送コードと結合する

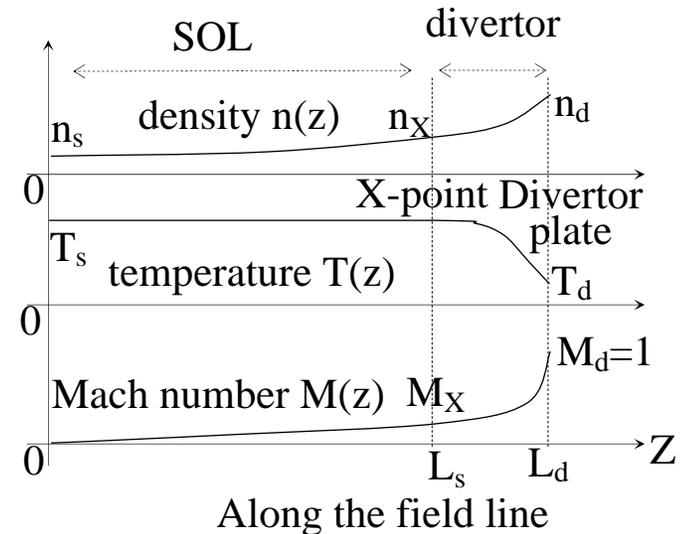


図. Two-point modelにおける密度、温度、マッハ数分布

解析条件

- SOL領域温度一定

- ダイバータ板上にて $M_d = 1$

粒子バランスのモデル化

仮定 : 全ての中性粒子はダイバータ領域で発生し、その発生割合はダイバータ板に流入するプラズマ粒子束に比例する。

1. 全中性粒子発生割合 N_n (ガスパフ項 N_{puff})

$$N_n = C_n n_d M_d C_s (T_d) 2\pi R \Delta_n \sin(\psi) + N_{\text{puff}}$$

2. ダイバータ領域で発生した中性粒子の内、 $f_{\text{ion}}^{\text{div}}$ の割合がダイバータ領域でイオン化する。
3. 残った中性粒子は、それぞれ $f_{\text{ion}}^{\text{core}}$ $f_{\text{ion}}^{\text{sol}}$ $f_{\text{ion}}^{\text{pump}}$ の割合でコアプラズマ, SOL, 排気領域に輸送

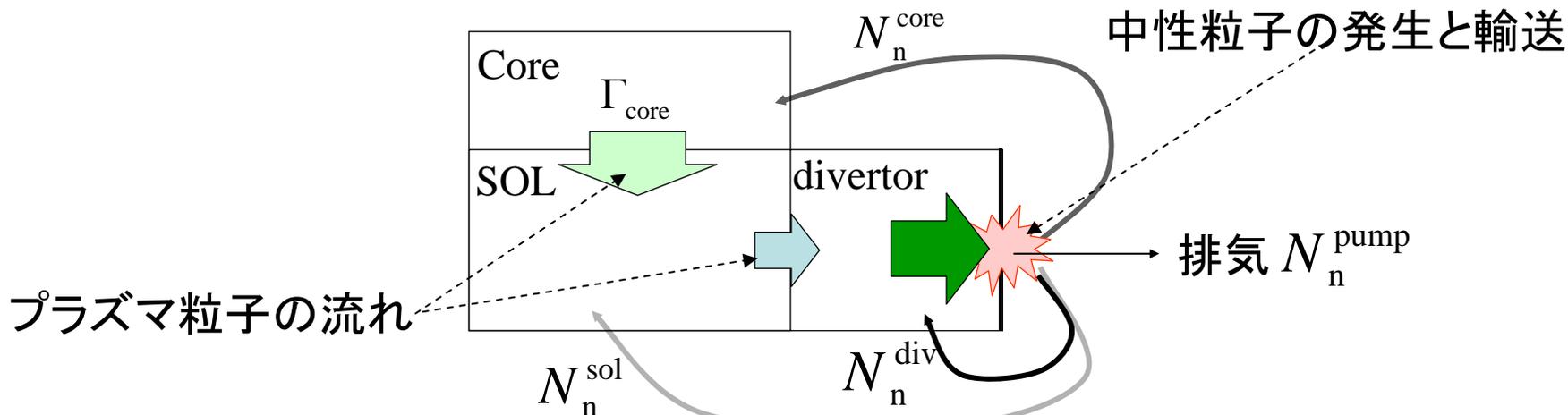


図.定常状態でのコア-SOL-ダイバータ領域の粒子バランス

粒子バランスのモデル化

•ダイバータ領域のイオン化割合[8]

$$N_n^{\text{div}} = f_{\text{ion}}^{\text{div}} N_n$$

$$f_{\text{ion}}^{\text{div}} = 1 - \exp\left(-\frac{L_d \sin \psi}{\lambda_{\text{ion}}^{\text{div}}}\right)$$

$$\lambda_{\text{ion}}^{\text{div}} = \frac{v_n}{n_d \langle \sigma v \rangle}$$

•コアプラズマでのイオン化割合

$$N_n^{\text{core}} = f_{\text{ion}}^{\text{core}} (1 - f_{\text{ion}}^{\text{div}}) N_n$$

$$f_{\text{ion}}^{\text{core}} = \frac{A_{\text{core}}}{A_{\text{core}} + A_{\text{sol}} + A_{\text{pump}}}$$

•SOL領域のイオン化割合

$$N_n^{\text{SOL}} = f_{\text{ion}}^{\text{SOL}} (1 - f_{\text{ion}}^{\text{div}}) N_n$$

$$f_{\text{ion}}^{\text{sol}} = \frac{A_{\text{sol}}}{A_{\text{core}} + A_{\text{sol}} + A_{\text{pump}}}$$

•粒子排気割合

$$N_n^{\text{pump}} = f_{\text{ion}}^{\text{pump}} (1 - f_{\text{ion}}^{\text{div}}) N_n$$

$$f_{\text{ion}}^{\text{pump}} = \frac{A_{\text{pump}}}{A_{\text{core}} + A_{\text{sol}} + A_{\text{pump}}}$$

A_j は各領域の実効的な面積. 現時点ではダイバータ領域から見通せる面積で評価.

2点モデルの検証

2次元ダイバータ輸送コードとの比較

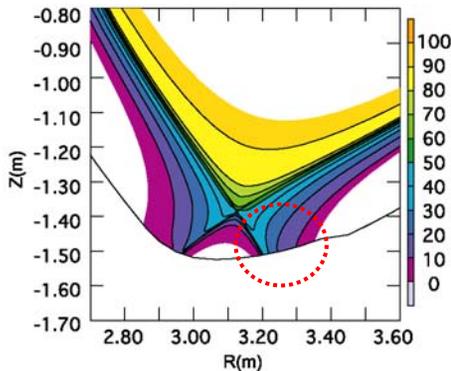
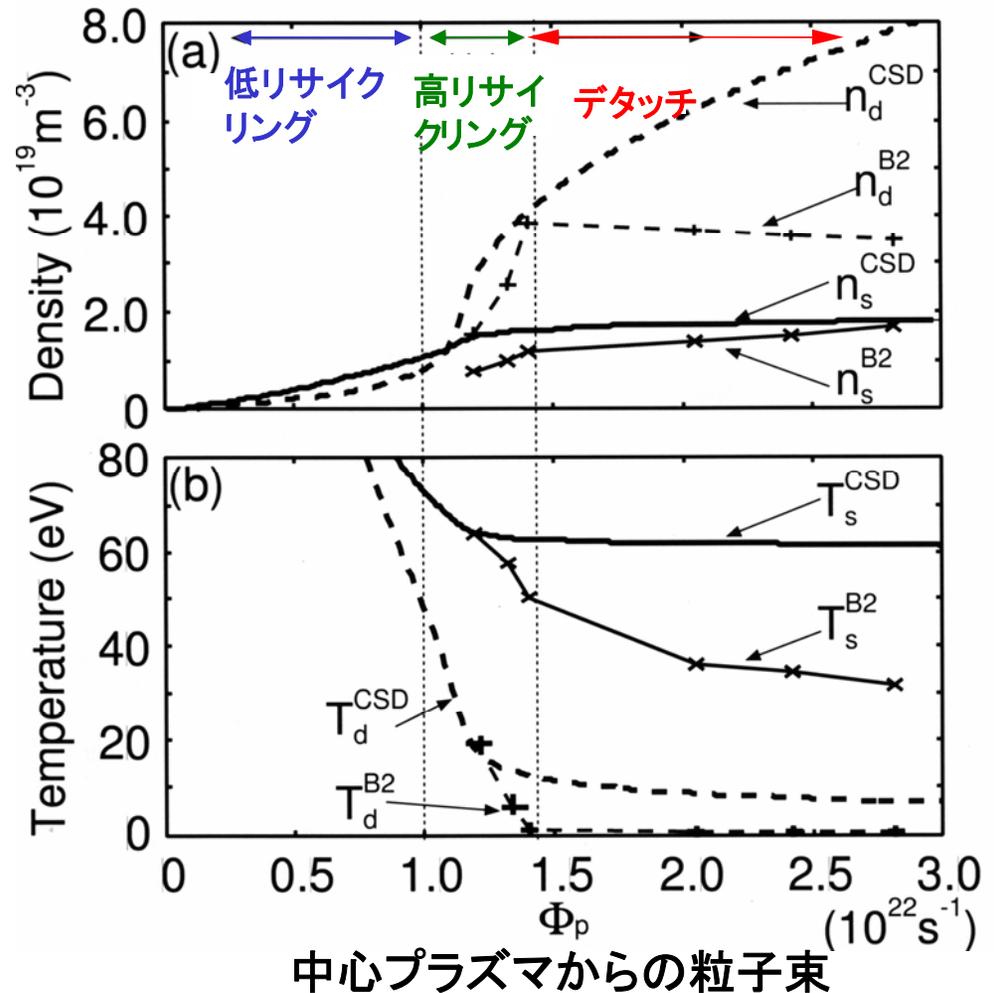


図 B2-EIRENEによるプラズマ温度の計算例

- 低リサイクリング領域から高リサイクリング領域では温度・密度ともに良い一致を示す
- **デタッチ領域**はモデリングが不十分であり、今後の課題



H-mode遷移モデルの検証

H-mode遷移モデルの検証方法

H-mode遷移加熱パワーの予測方法

実験的手法: H-mode遷移加熱パワー比例則による

$$P_{th}^{SCL} = 0.072 |B|_{out}^{0.7} n_{20}^{0.7} S^{0.9} (Z_{eff}/2)^{0.7} F(A)^{\gamma}$$

理論的手法: H-mode遷移モデルを用いた予測手法

H-mode遷移モデルはいくつか提案されているものの
実験データの定量的な予測まで十分モデル化されていない

H-mode遷移モデルの検証方法

1. 1次元プラズマ輸送コードにH-mode遷移モデルを導入
2. 輸送計算を行うことによりH-mode遷移加熱パワー P_{th}^{sim} を求める
3. 比例則によるH-mode遷移加熱パワー P_{th}^{SCL} を求める
4. 磁場、密度の依存性に着目し P_{th}^{sim} と P_{th}^{SCL} を比較する

H-mode遷移加熱パワー比例則

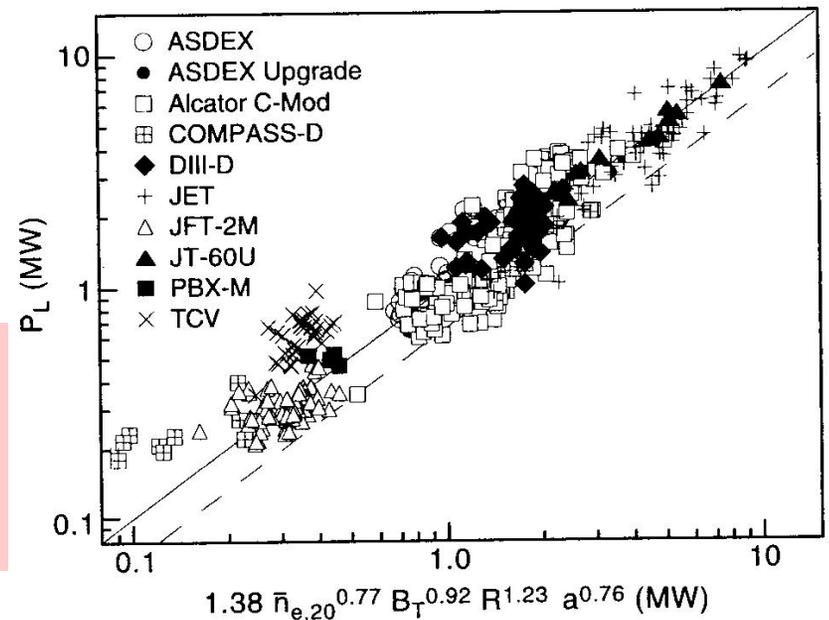
H-mode放電を行うためには、ある一定以上の加熱パワーが必要であることが実験的にわかっている。ITERでは外部加熱パワーが約50MW程度あれば、H-mode放電へ遷移すると予測されている。

H-mode 遷移加熱パワー比例則

$$P_{th}^{LH} = 2.67 M^{-1} B_t^{0.96} n_{20}^{0.77} R^{1.22} a^{0.76}$$

問題点

内挿ではなく外挿している
⇒ 物理の理解が必要



H-mode遷移加熱パワー

1次元輸送計算による検証の概要

• LH 遷移条件:

$r/a=0.96$ に設定

• 拡散係数

$$\chi_{e,i}^{ano} = C_{e,i} (1 + r^2/a^2) a^2 / \tau_E^{ITER89P}$$

• プラズマ形状

JT-60U like

$R=3.4$ m $a=0.9$ m $\kappa=1.5$

• プラズマ電流

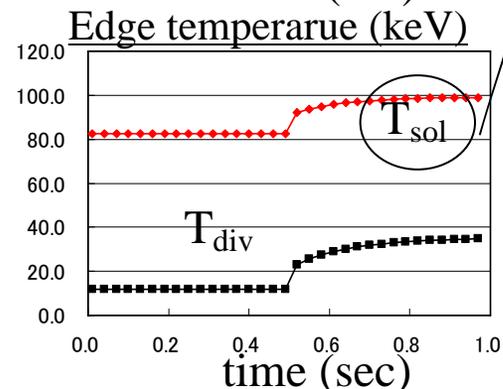
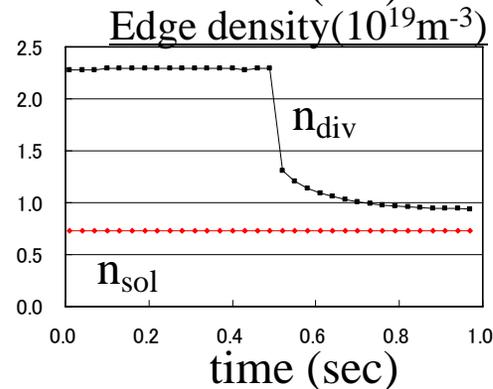
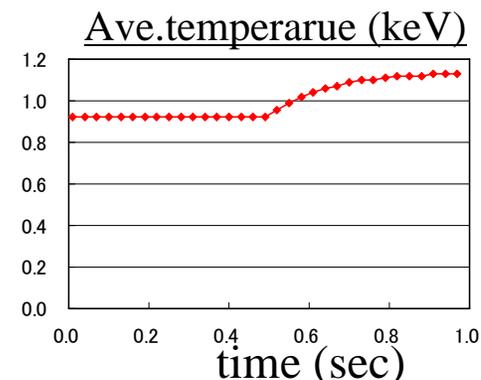
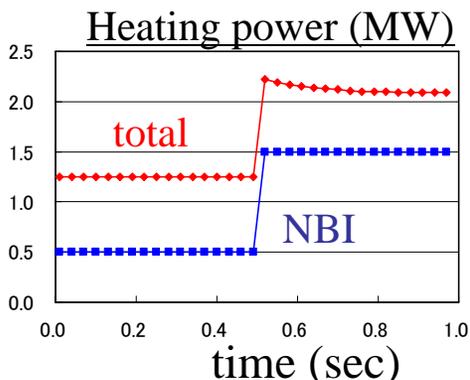
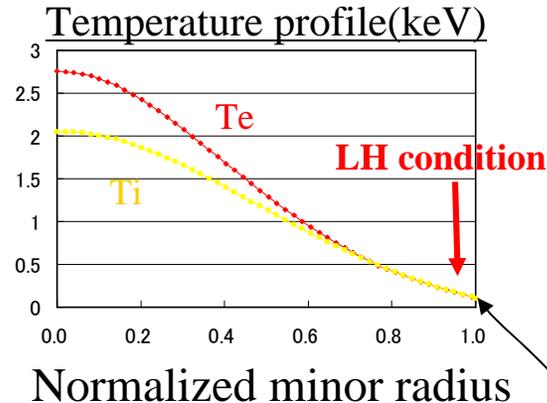
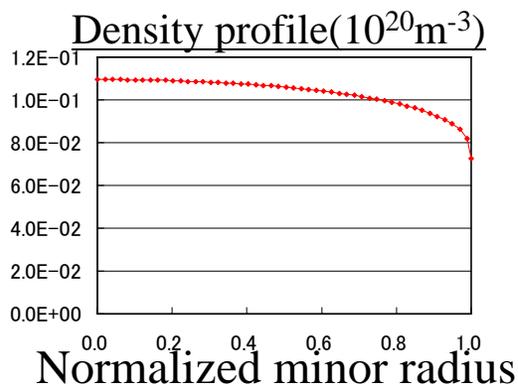
$I_p = 2.0$ MA

• 安全係数

$3.0 < q_{95} < 5.0$

• 密度境界条件

$$n_{edge} = n_{sol} = 0.667 * \langle n_e \rangle$$



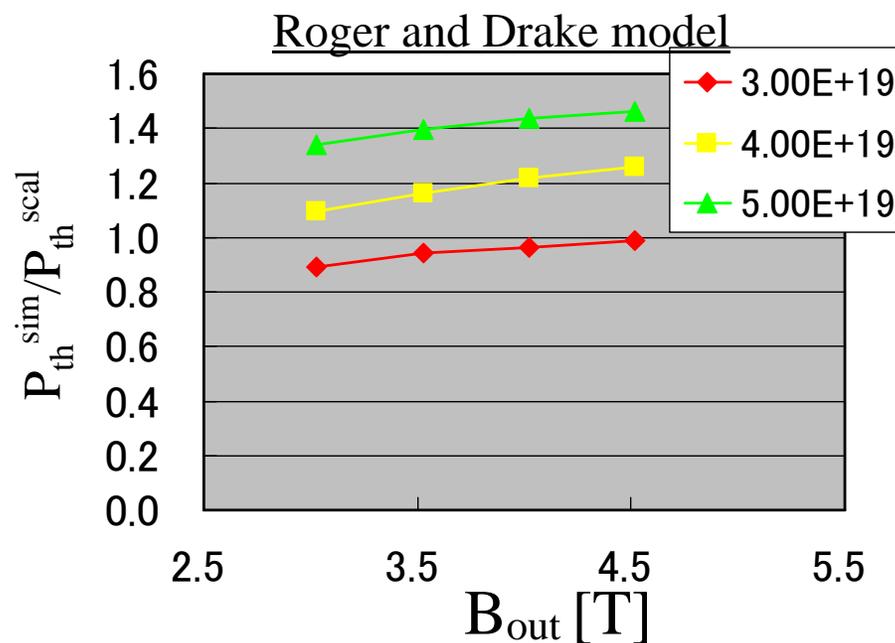
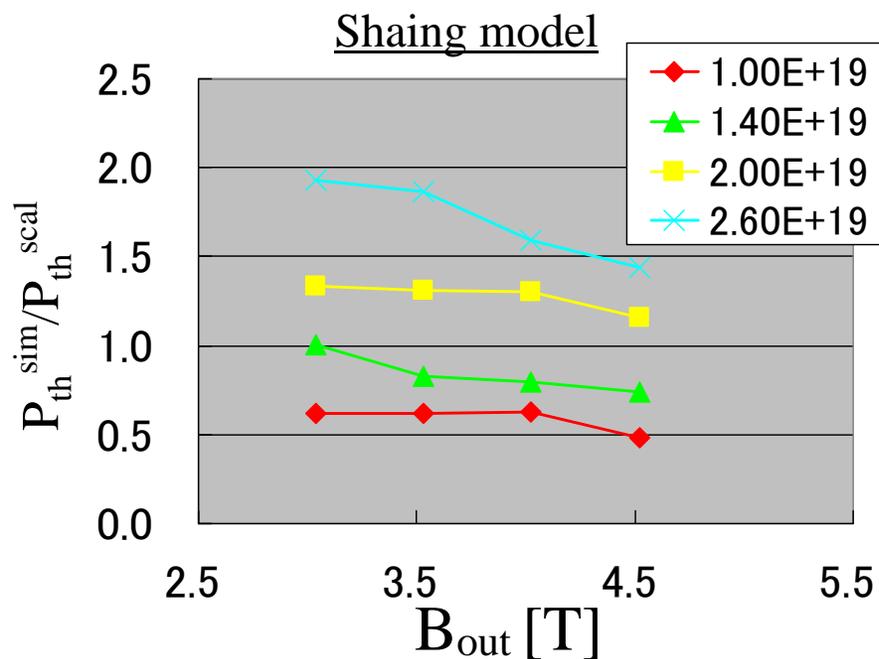
検証結果 ～磁場依存性～

H-mode遷移加熱パワー比例則の B_{out} と N_{20} の依存性に着目

P_{th}^{scal} : 比例則から求めたH-mode遷移加熱パワー

$$P_{th}^{LH} = 0.072 | B_{out} |^{0.7} n_{20}^{0.7} S^{0.9} (Z_{eff} / 2)^{0.7} F(A)^{\gamma}$$

P_{th}^{sim} : H-mode遷移モデルから求めたH-mode遷移加熱パワー



$P_{th}^{sim} / P_{th}^{scal}$ が磁場に対してほぼ一定値 \Rightarrow 磁場の依存性($\sim B^{0.7}$)を再現

検証結果 ～密度依存性～

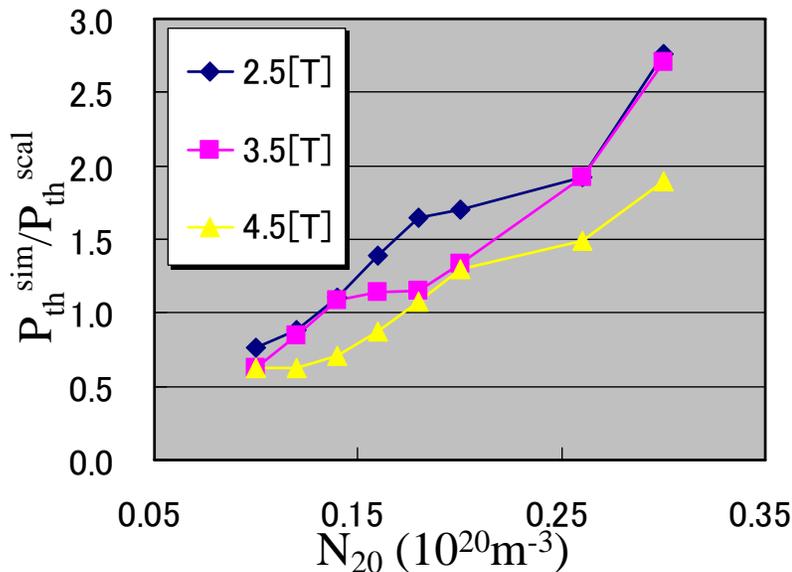
H-mode遷移モデルから求めた密度依存性

Shaing model : $P_{th} \sim n_{20}^{1.7}$

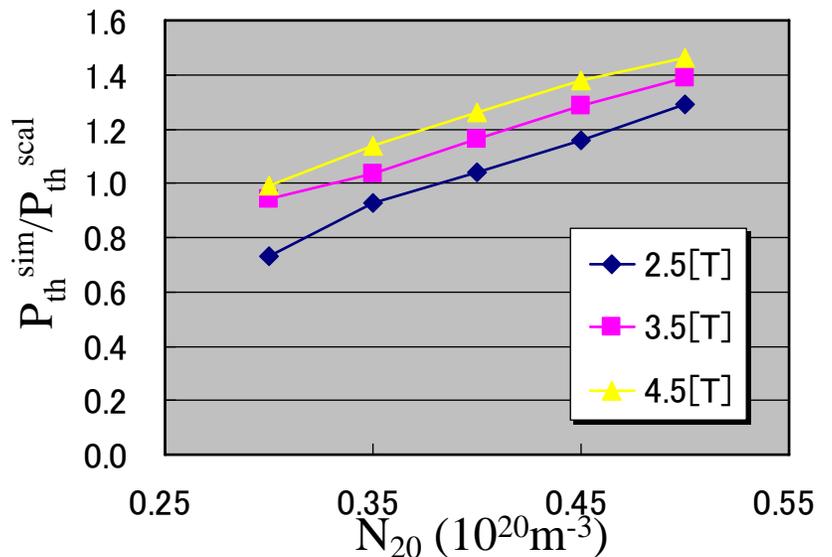
Roger and Drake model : $P_{th} \sim n_{20}^{1.7}$

- H-mode遷移加熱パワー比例則 ($\sim n_{20}^{0.7}$) と同じ正の依存性をもつ
- 依存性の大きさは理論モデルのほうが大きい → 今後の課題

Shaing model



Roger and Drake model



H-mode遷移時の境界温度

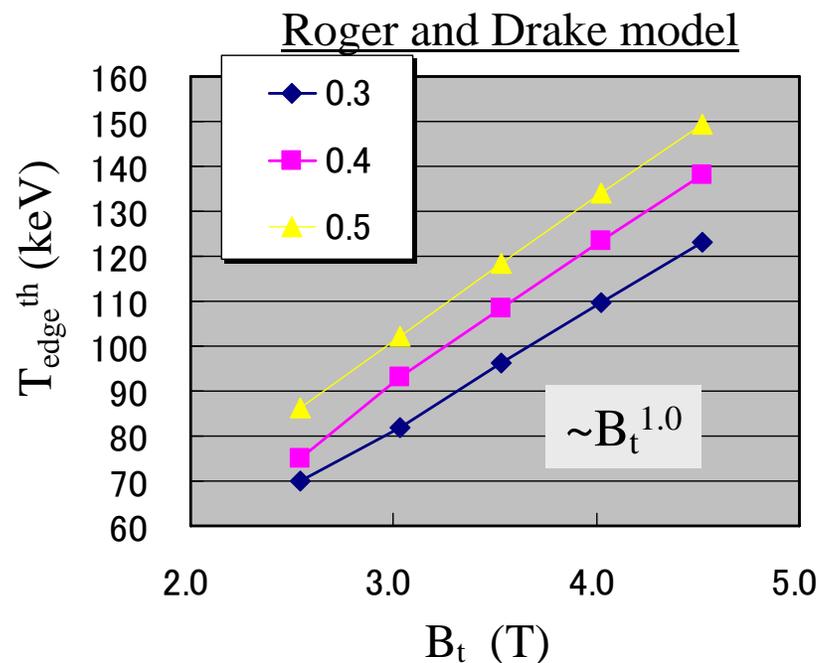
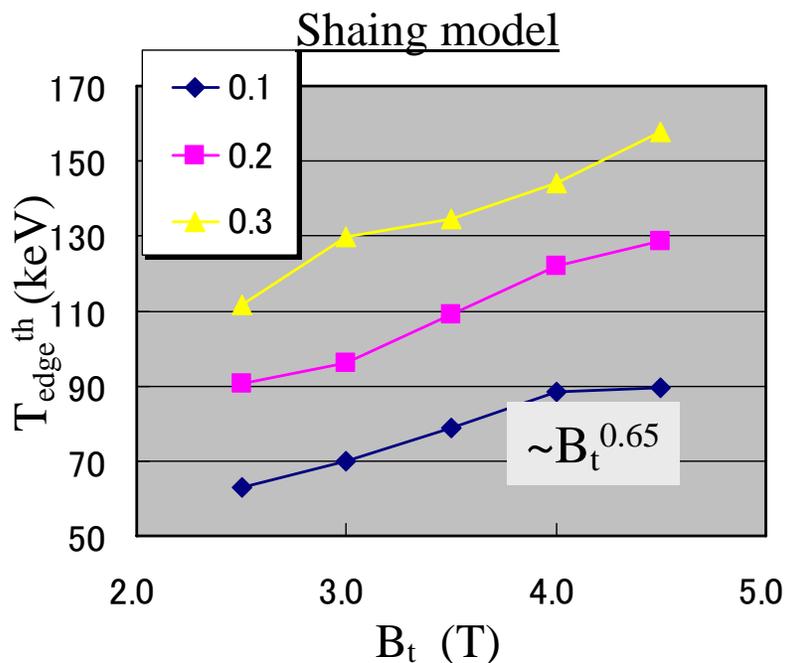
H-mode遷移した時の境界領域の温度の依存性[W.Suttrop, et al., PPFC29(1997)2051]

$$T_{e,b}^{thresh} \sim n_{e,b}^{-0.3} B_t^{0.8(+0.2-0.1)} n_{20}^{0.7} I_p^{0.5(\pm 0.2)}$$

1次元輸送計算から求められたセパラトリックスのプラズマ温度

Shaing model : $T_e^{th} \sim B_t^{0.65}$

Roger and Drake model : $T_e^{th} \sim B_t^{1.0}$



H-mode遷移時の境界領域の温度の磁場依存性も再現

まとめ

プラズマ立ち上げ時のH-mode遷移条件とダイバータデタッチ条件の両方に整合するプラズマ制御指針の解明するために、以下のような検討を行った。

- 1次元プラズマ輸送コードと周辺プラズマ2点モデルを結合するために、周辺プラズマに関する粒子バランスを導入し2点モデルに改良を加えると共に、低リサイクリング領域－高リサイクリング領域においては2次元ダイバータ輸送コードの結果を再現することを確認した。デタッチ領域は今後の課題である。
- 1次元プラズマ輸送コードと周辺プラズマ2点モデルを結合し、H-mode遷移加熱パワー比例則と比較することでH-mode遷移モデルの検証を行った結果、Shaing modelとRoger and Drake modelが磁場、密度の依存性の観点から比較的良い再現性を示すことがわかった。さらにこれらの遷移モデルは、H-mode遷移時の周辺プラズマ温度の磁場依存性も再現性がある事がわかった。

残された課題としては、ダイバータ2点モデルを用いたデタッチ条件のモデリングを行う必要がある。

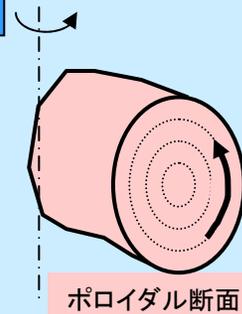
H-mode輸送障壁モデリング(2)

境界領域の磁気面におけるイオンの運動方程式

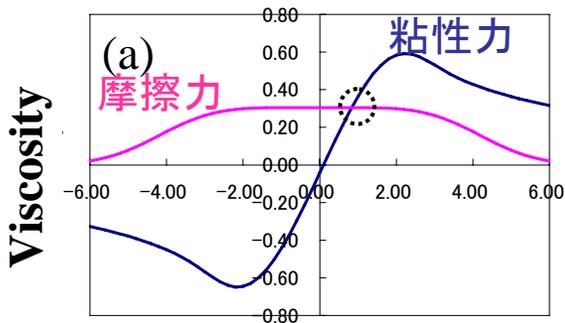
$$\langle \mathbf{B} \cdot \nabla \cdot \Pi_i \rangle = \langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}_{i,orb} \rangle$$

非補足粒子による
粘性力

補足粒子の軌道損失による
摩擦力(回転トルク)



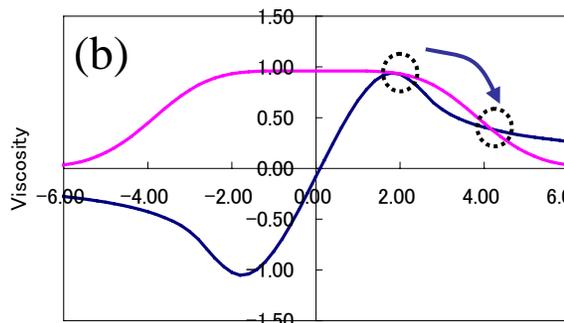
L-mode phase



Poloidal Mach Number

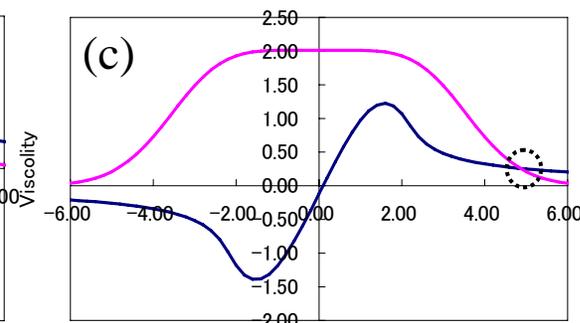
低温領域

L-H transition phase



Poloidal Mach Number

H-mode phase



Poloidal Mach Number

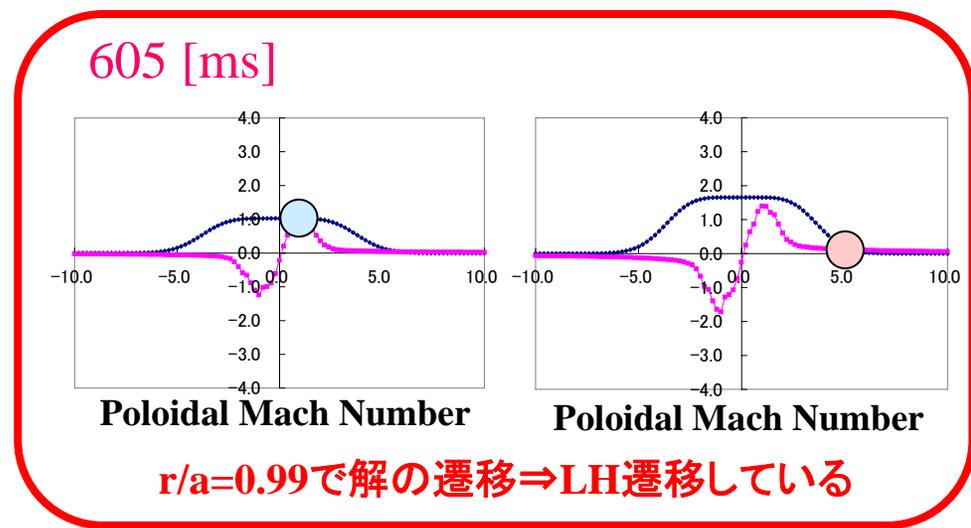
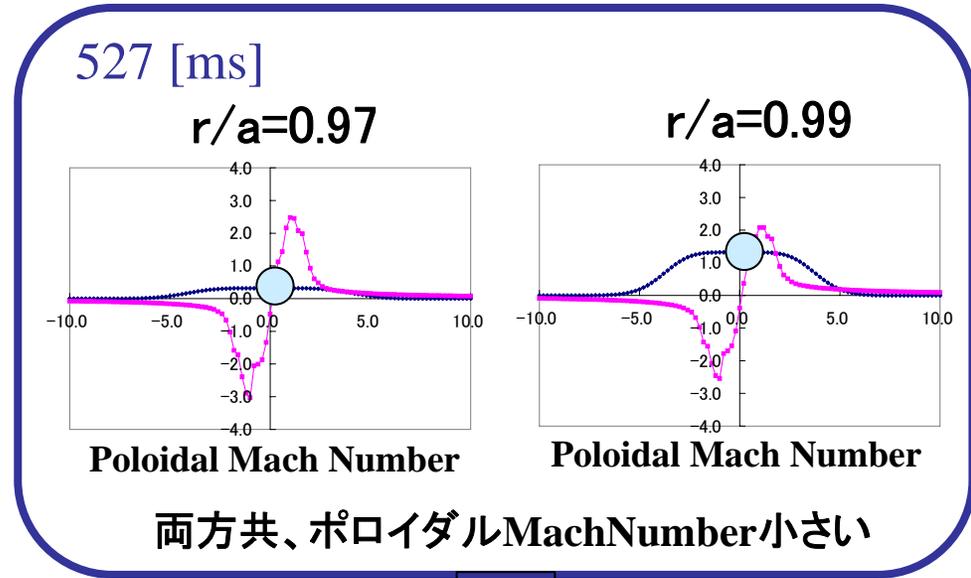
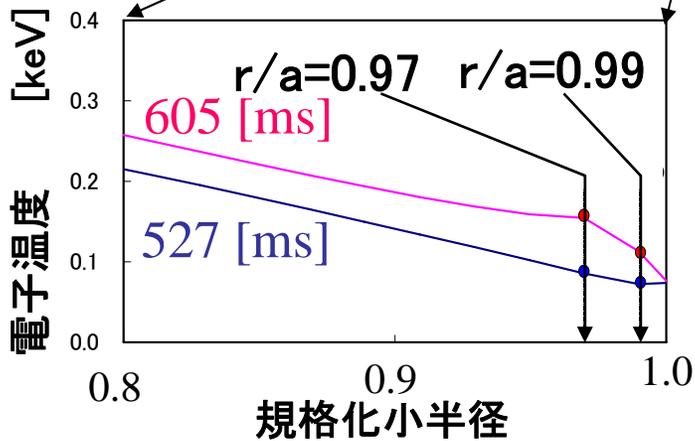
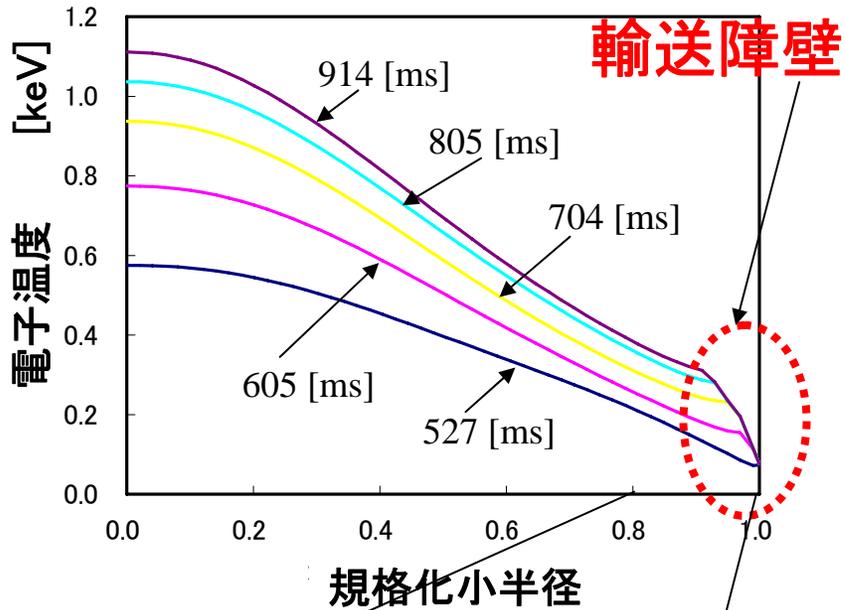
高温領域

LH遷移条件: 規格化衝突周波数に閾値

$$V_i^* < V_c$$

境界領域で補足粒子は全て損失するという条件を各磁気面に適用できるように拡張

H-mode輸送障壁モデリング(3)



Rogers and Drake model

Edge Plasma Phase Space

$$\alpha_{MHD} = -Rq^2 \frac{d\beta}{dr}, \quad \alpha_{dia} = V_{di,e} \frac{t_0}{L_0}$$

$$V_{di,e} = \rho_s c_s / L_{pi,e}, \quad \rho_s = c_s / \Omega_{ci}, \quad c_s^2 = (T_e + T_i) / m_i$$

$$t_0 = (RL_p / 2)^{1/2} / c_s,$$

$$L_p = 2\pi q (v_{ei} R \rho_s / 2\Omega_e)^{1/2} (2R / L_p)^{1/4}$$

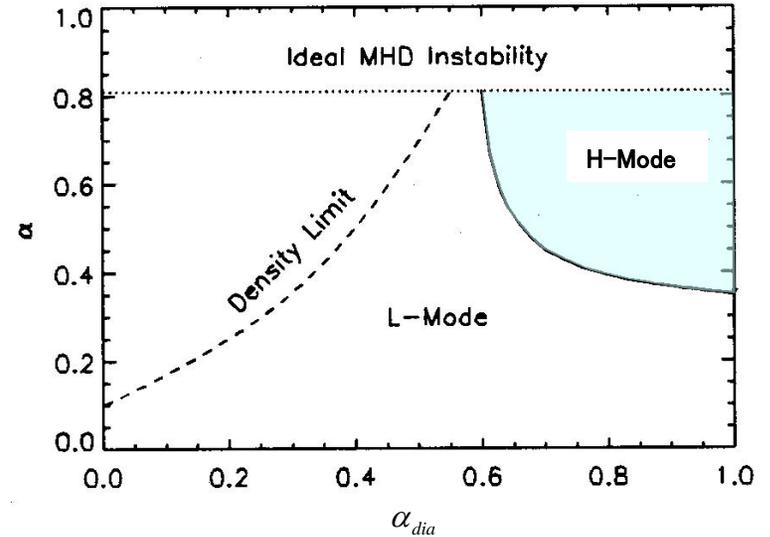


FIG. 1. Edge plasma phase space.

[B.N.Rogers, *et.al.*, Phys. Rev. Lett. 81(1998)4396]

LH Transition Condition

$$\alpha_{MHD} \geq \alpha_{MHD}^{LHth} = -0.136 + 0.972\alpha_{dia}^{-2} - 0.633\alpha_{dia}^{-4} + 0.146\alpha_{dia}^{-6}$$

$$(0.6 < \alpha_{dia} < 1.0)$$