

Core-SOL-Divertor 簡易輸送モデルと HT-7U, JT-60U, ITERへの適用

若手科学者によるプラズマ研究会
2004年3月17-19日、日本原子力研究所那珂研究所

(財)電力中央研究所 狛江研究所 原子力システム部

日渡 良爾, 岡野 邦彦, 朝岡 善幸

慶応大学工学部

葛山 康志, 畑山 明聖

中国科学院プラズマ物理研究所

S.Zhu

核融合科学研究所

富田 幸博



研究背景

核融合炉実現へむけての課題の一つ

中心プラズマ運転領域

Temperature $\langle T \rangle$, density $\langle n_e \rangle$
H-mode, RS mode, ELM, etc.

整合性？

周辺プラズマ運転領域

Detached condition, He exhaust
Impurity seed, MARFE, etc.

トカマクに於いて正味電気出力に必要なプラズマ性能[1]

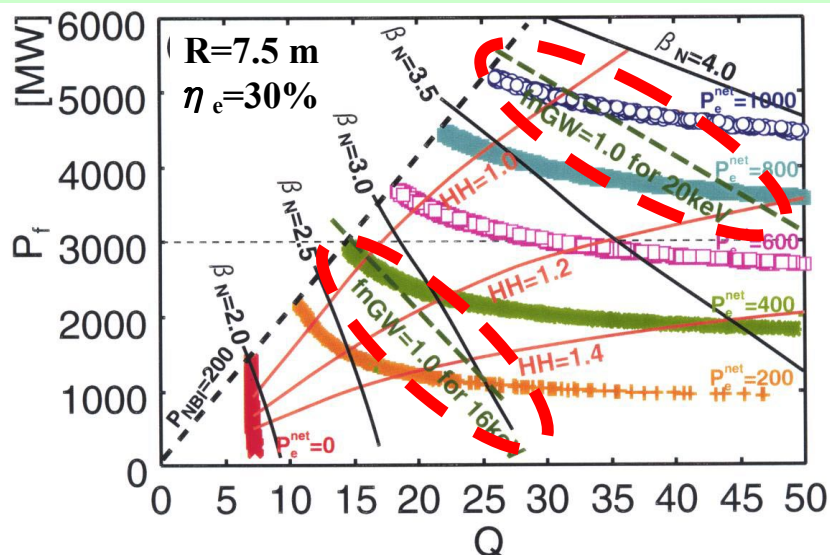


Fig1.正味電気出力に必要なプラズマ性能

Greenwald密度上限値比 $fn_{GW} \leq 1.0$ を仮定

- 電気出力 $P_{net}=1000\text{MW}$, $\langle T \rangle \geq 20 \text{ keV}$ が必要
- $\langle T \rangle \sim 16\text{keV}$ 以上温度が上げられない場合, 電気出力 $P_{net} \geq 500\text{MW}$ 以上は得られない.
- 高温低密度プラズマは高ダイバータ熱負荷となる.

整合性の取れた制御？

高温プラズマ運転 \longleftrightarrow ダイバータ制御条件

開発目標値 fn_{GW}

広範囲のパラメータ領域に関する運転領域の評価には, 2次元ダイバータコードよりも簡易モデルの方が便利である.



研究目的

中心・周辺プラズマの運転領域とその整合性を調べるためのCore-SOL-Divertor 簡易輸送モデルを開発する。

C-S-D 簡易モデルの概要[2]

中心プラズマ輸送モデル

0D プラズマ輸送モデル
(ITER physics guidelines[3])

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}

combine

周辺プラズマ輸送モデル

Two-point モデル[4]

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

輸送の時間スケールの違いから中心プラズマ輸送モデルは非定常モデル、周辺プラズマ輸送モデルは定常輸送モデルの結合を考える。

Problem : 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



研究内容

- **Core-SOL-Divertor簡易輸送モデル**
- **B2-EIRENE との比較**
- **HT-7U 定常運転領域の評価**
- **ITER, JT-60U LH遷移時への適用**
- **JT-60Uダイバータデータベースによる検証作業**
(来年度共同研究予定)
- **今後の課題とまとめ**

中心プラズマモデル

0D プラズマ輸送モデル(ITER physics guidelines[3])

$$\frac{dW_p}{dt} = -\frac{W_p}{\tau_E} + P_\alpha + P_{OH} + P_{aux} - P_{Brad} - P_{sync}$$
$$\frac{dn_j}{dt} = -\frac{n_j}{\tau_{pj}} + S_j \quad (j=e, He)$$

- 電荷中性条件による燃料粒子密度
- スケーリング則によるエネルギー閉じ込め時間
- 粒子閉じ込め時間: $\tau_{pj} = C_{pj} \tau_E$

LH 遷移条件[5]

- プラズマ加熱パワー P_{in} が LH threshold power スケーリング則 P_{thr} を越えたらH-modeに遷移.
- プラズマ加熱パワーがLH threshold powerの1/2より小さくなったらL-modeへ逆遷移.

$$P_{thr} = 2.76 M^{-1} B_t^{0.92} n_{20}^{0.77} R^{1.23} a^{0.76}$$

$$P_{in} = P_\alpha + P_{OH} + P_{aux} - P_{Brad} - P_{sync}$$

L to H transition case

$$P_{in} \geq P_{thr}$$

H to L transition case

$$P_{in} \leq \frac{1}{2} P_{thr}$$

周辺プラズマモデル

Two-point モデル[4]

- momentum balance in SOL-divertor region

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

- global energy balance in SOL-divertor region

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

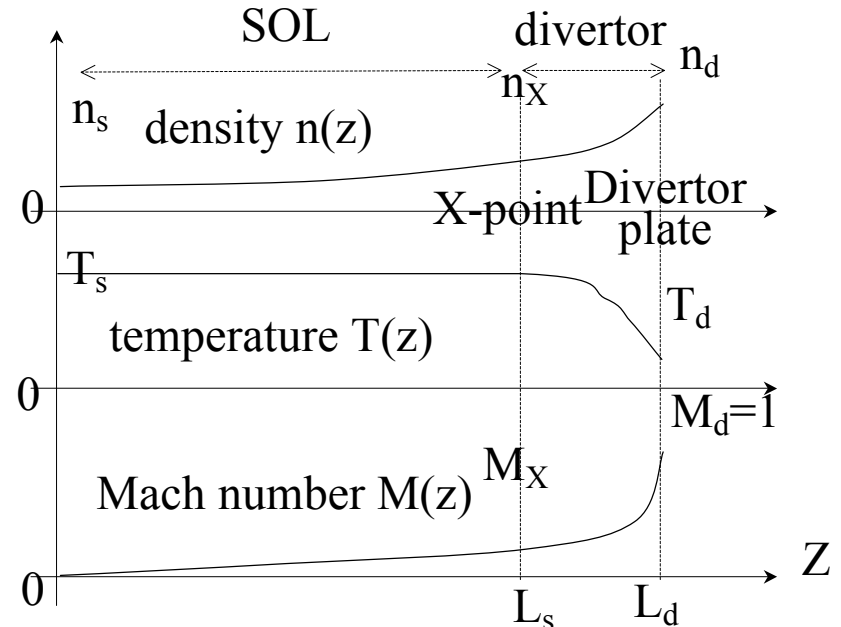
- radial energy transport in SOL region

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

- electron thermal transport along the field lines

$$\frac{1}{2} L_d^2 q_{\perp} = \frac{4\kappa_0 \Delta}{49} T^{7/2} \left[1 - \left(\frac{T_d}{T_s} \right)^{7/2} \right] - \frac{5}{4} \Delta n_s T_s \left(\frac{M_X}{2} \right) C_s(T_s) L_s$$

- SOL 領域では温度一定.



Along the field line
Fig.2 周辺プラズマでの密度, 温度, マッハ数

SOL上流とダイバータ領域の密度・温度の関係が得られる.

中性粒子輸送簡易モデル^[6]

ダイバータ領域での中性粒子発生率は、ダイバータ板へ流入する総粒子数に比例すると仮定。

ガスパフ N_{puff} を含めた中性粒子発生率 N_n

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

$$S_n^{div} = f_{ion}^{div} N_n$$

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

$$S_n^{core} = (1 - f_{ion}^{SOL}) (1 - f_{ion}^{div}) N_n$$

•ダイバータ領域におけるイオン化率

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

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

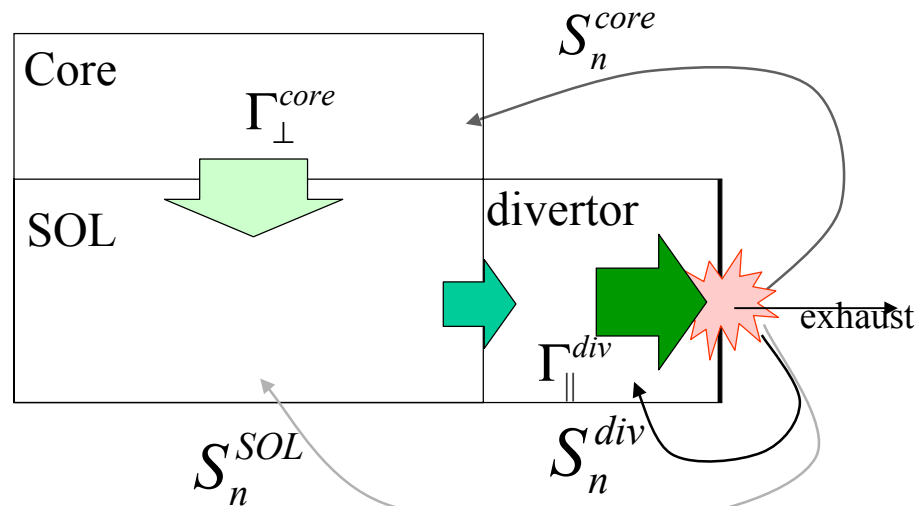


Fig.3 Core-SOL-Divertor領域に関する定常状態の粒子バランス。

以上の中性粒子モデル、イオン化モデルによりダイバータ領域での粒子バランスを考える。

ダイバータ領域の粒子バランス

$$\Gamma_{\parallel}^{div} A^{div} - \Gamma_{\parallel}^X A^X = S_n^{div} (= f_{ion}^{div} N_n)$$

•磁力線に平行な粒子束:

$$\Gamma_{\parallel}(z) = n(z)M(z)C_s(T(z))$$

•磁力線に垂直方向のSOL断面積: A

X点における密度 n_X マッハ数 M_X が粒子バランスを解くのに必要

X点でのマッハ数[7]

SOL領域での粒子・運動量バランスの式からX点でのマッハ数を求める

$$\frac{M_X}{1+M_X^2} = \frac{(1-f_{mom}^{div})}{(1+M_d^2)n_d T_d A^X} \sqrt{\frac{m T_s}{e}} [\Gamma_{\perp}^{core} A^{pl} + S_n^{SOL}]$$

X点での密度

SOL上流の密度 n_s とダイバータ領域の密度 n_d の平均と仮定.

$$n_X = (n_s + n_d) / 2$$



B2-EIRENEとの比較

JT-60U ダイバータ解析結果との比較 [8]

- 内側ダイバータを対象とする.
- SOLを横切る熱流速の内側ダイバータへのパワー流入割合 $P_{in}/P_{all} = 0.34$.
- 不純物放射割合 約30 %

	C-S-D model	B2-EIRENE[5]
SOL density n_s [m^{-3}]	1.3×10^{19}	$\sim 1 \times 10^{19}$
SOL Temp. T_s [eV]	62.5	~ 55
Div density n_d [m^{-3}]	2.6×10^{19}	$\sim 3 \times 10^{19}$
Div Temp. T_d [eV]	15.9	~ 16

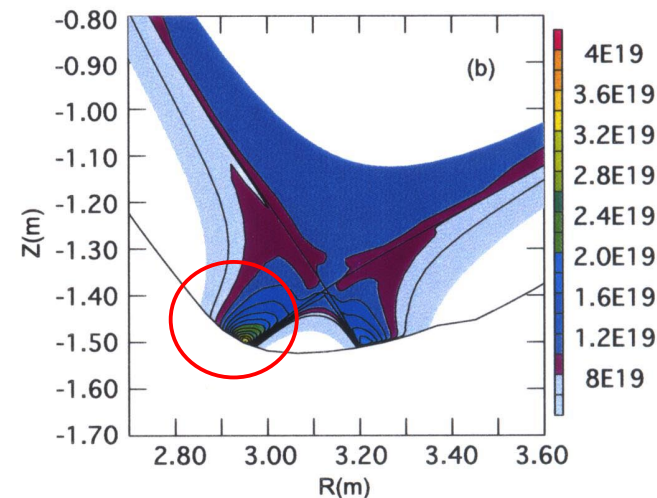
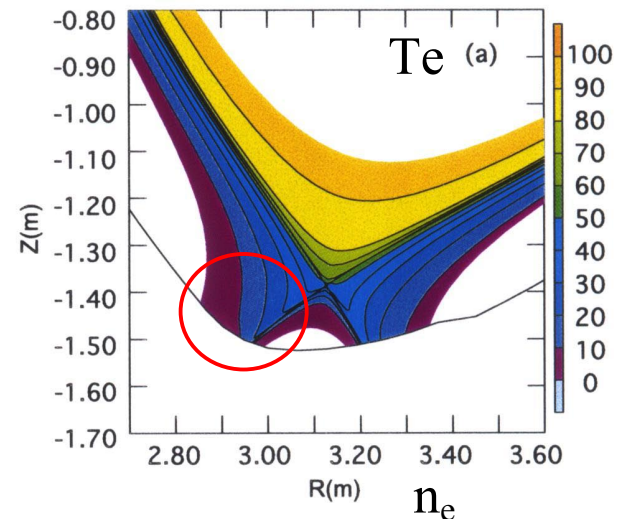
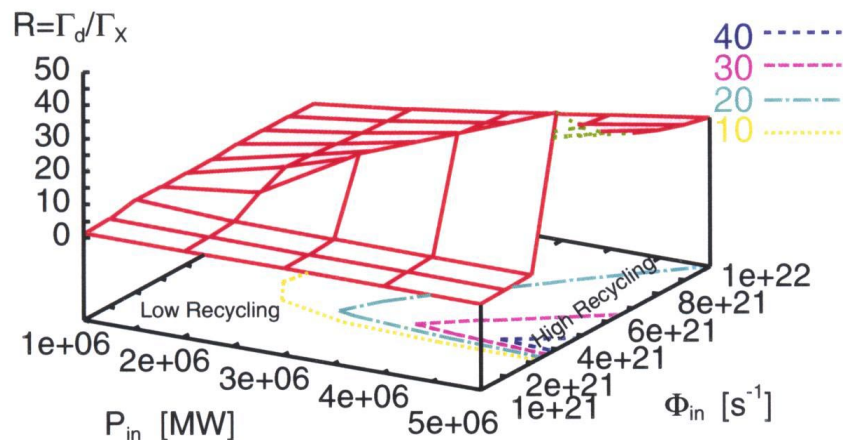


Fig.4 T_e and n_e of B2-EIRENE



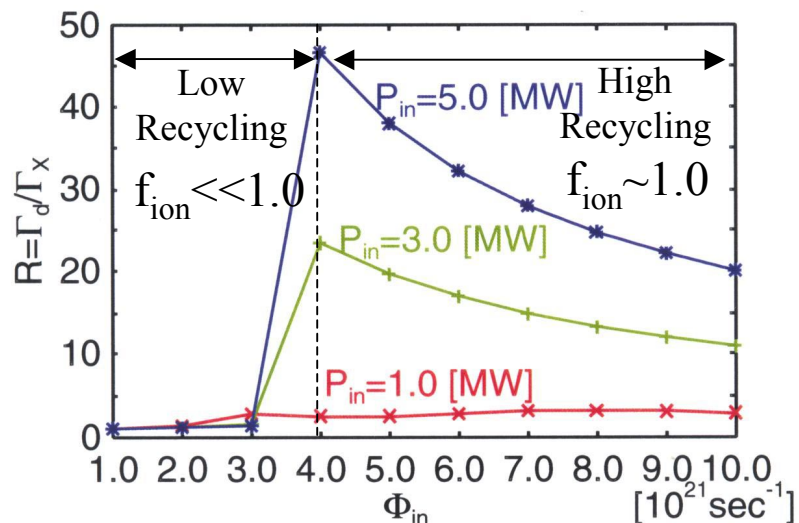
リサイクリング状態の遷移現象

ダイバータ領域において低リサイクリング状態から高リサイクリング状態への遷移が理論的に予測されており[9], 実験的にもこれに対応すると考えられるデータが得られている[10]



C-S-D モデルを用いても低リサイクリングから高リサイクリング状態への遷移現象が再現できる。

- ダイバータ領域での粒子束増倍係数 $R = \Gamma_{div} / \Gamma_X$
- JT-60U のプラズマ配位
- SOLに流入する全熱流速 P_{in} and 全粒子束 Φ_{in}



HT-7U への適用

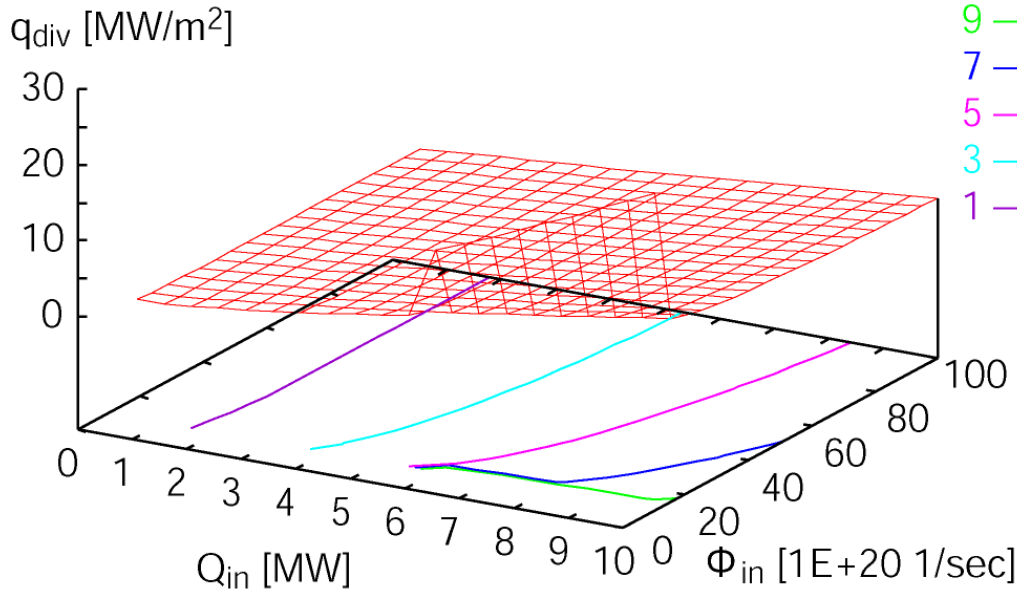
HT-7U 初期実験計画ではNBIが装備されておらず, LHによる電流駆動定常実験が計画されている. 従って, 電流駆動にとっては低密度が望ましいが, ダイバータにとっては熱負荷を抑えるために高密度が求められる.

HT-7Uのダイバータ熱負荷

- C-S-D モデル
- 入力パラメータ, Q_{in} and Φ_{in}
- ダイバータ熱負荷の評価式

$$q_d = k_B (\varepsilon + \gamma T_d) n_d M_d C_{sd} \sin \psi \sin \theta$$

Table 2: HT-7U parameter[7]



Case	Fat-D
形状	ダブルヌル
R/a (m)	1.97/0.5
κ	1.6
ダイバータ位置	外側下部
τ_E (s)	0.15 (H-mode)
リサイクリング状態	High Recycling

HT-7Uへの適用(2)

HT-7U電流駆動評価

電流駆動パワー~3.5MWが上限値, 全加熱パワーは最大7.0MW

$$I_p = \frac{0.122T_e}{Rn_{20} \ln \Lambda} \frac{j^*}{p^*} P_{LHCD}$$

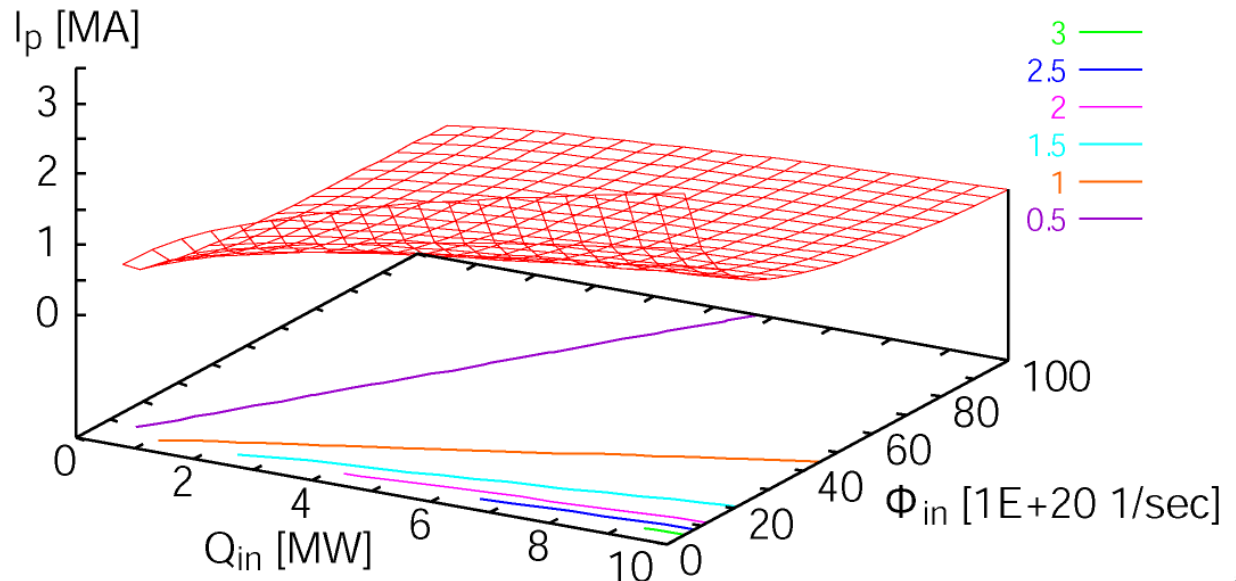
$$Q_{in} = 3n_e k_B T_e / \tau_E$$

$$\Phi_{in} = 2n_e V_p / \tau_p$$

$$\tau_E = f_H \tau_E^{ITER89}$$

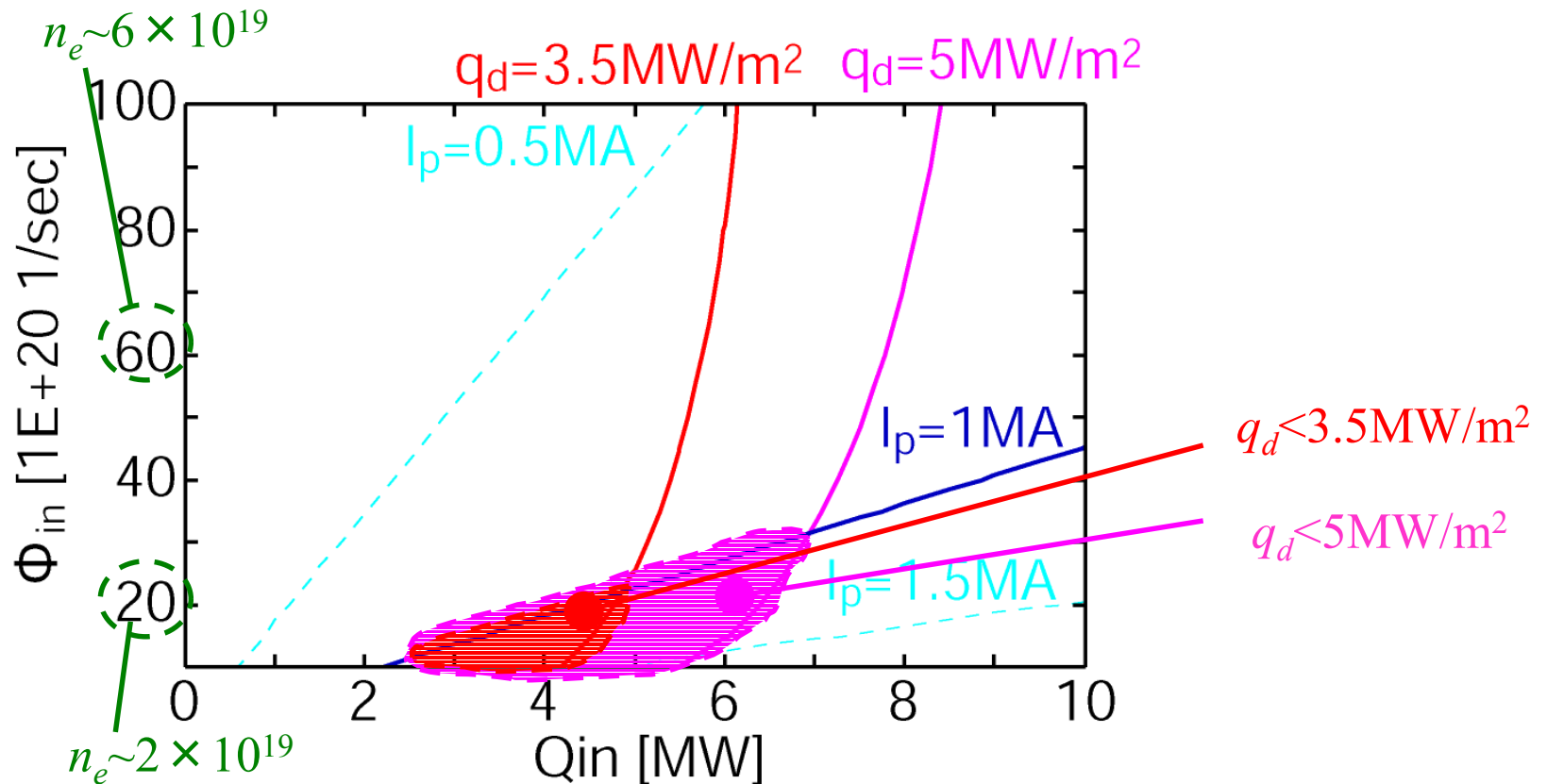
Φ_{in} と Q_{in} に関する線形の関係式

$$\Phi_{in} = f(I_p) Q_{in}$$



HT-7Uの定常運転領域

HT-7Uの定常運転可能領域



プラズマ密度 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 周辺に運転可能領域が存在する。

ITER LH遷移への適用

C-S-DモデルによるITER プラズマパラメータの時間発展

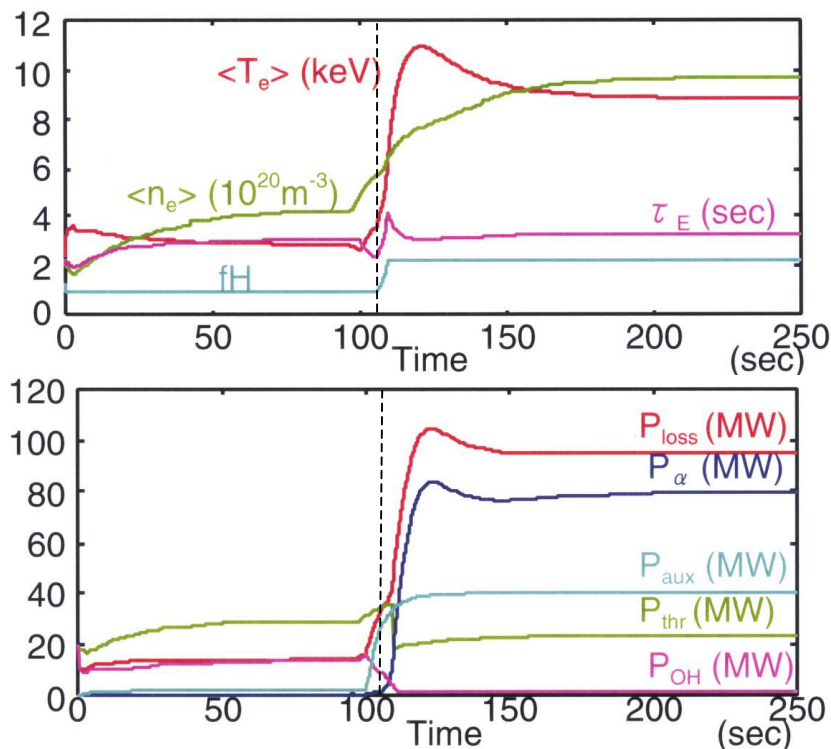


Fig.7 ITER LH transition phase by C-S-D model

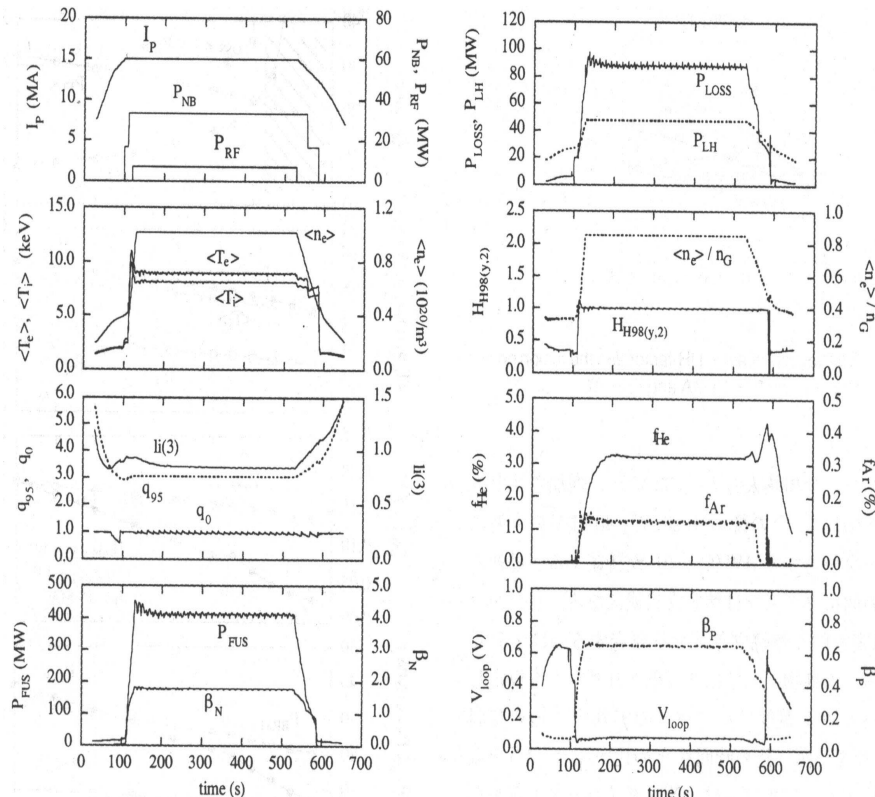


Fig8. reference scenario of ITER inductive operation[7].

- t=250 sec ではITER誘導運転シナリオの結果をC-S-Dモデルによりほぼ再現。
- LH遷移前の t=100 sec でもほぼ同じようなプラズマパラメータ。
- t=95 secに密度増加開始。
- t=100 secに追加熱開始。
- t=104 sec にH-modelに遷移する。



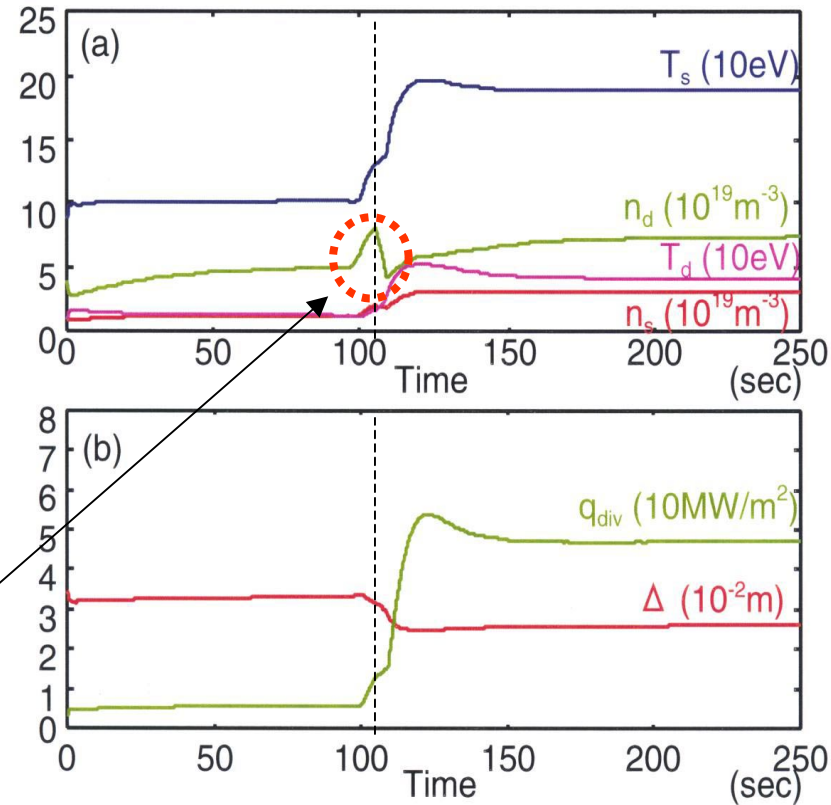
ITER LH 遷移への適用

SOL・ダイバータパラメータの時間変化

周辺プラズマ解析条件

- デタッチ条件は考慮されていない。
- SOL密度がITER設計値になるように粒子閉じ込め時間を校正する。

- ダイバータ密度がLH遷移時に振動する。
- ダイバータ制御に問題がある？
- 良い効果それとも悪い効果か？



現存する装置でこのような現象が観測されているか？

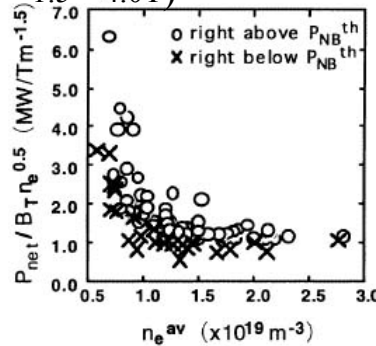
JT-60U LH遷移への適用

H_{α} のデータによると、ダイバータ密度振動はない[12]

JT-60Uのプラズマ配位での輸送計算

- プラズマパラメータ: $B_t=2.5$ T, $q_{95}=4.0$ $I_p=1.2$ MA, $k=1.5$
- LH 遷移加熱パワーは実験データをベースに[11]
(parameter region: $I_p=0.9\sim 2.4$ MA, $B_t=1.5\sim 4.0$ T)

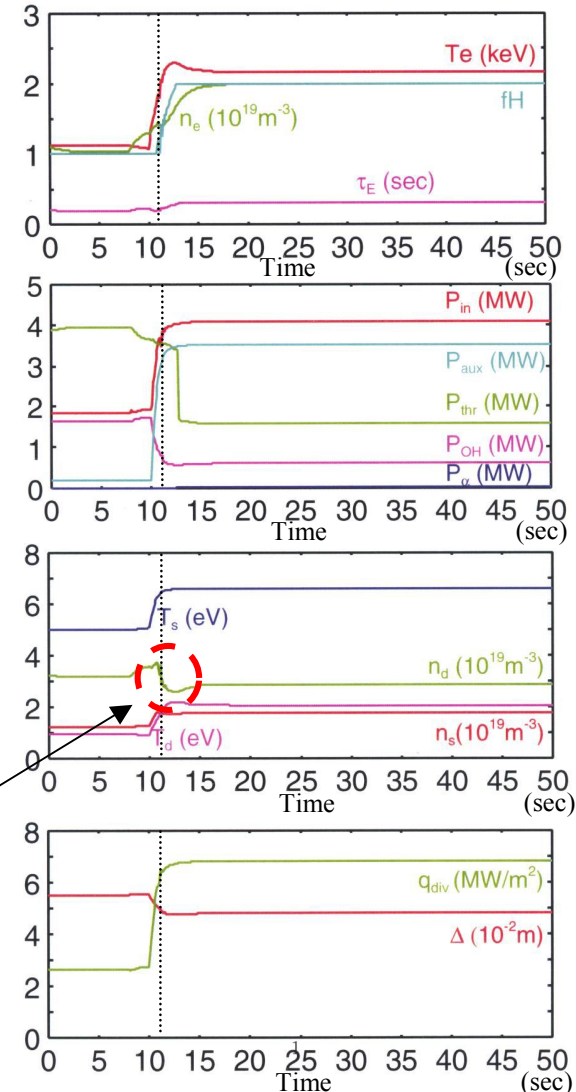
$$P_{th}^{JT-60} = \left(0.2 + 1.4 / n_{19} \right) n_{19}^{0.5} B_t$$



C-S-Dモデルでもダイバータ密度振動は見られない

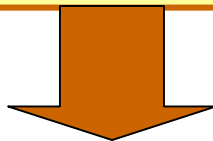
ITERでLH遷移過程のダイバータ制御について

- 粒子・熱輸送閉じ込め改善
- デタッチ条件
の整合性を評価する必要がある。



今後の課題とJT-60U共同研究

- ダイバータのリサイクリングに関するデータベース(DRC-JT60U.DB.v1)と高密度実験データを用いたCore-SOL-Divertor モデルの検証作業
- ダイバータデタッチ条件のモデル化



- HT-7U運転領域の詳細解析
- JT-60U 低リサイクリングー高リサイクリング遷移現象への適用
- ITERのLH遷移時のダイバータ制御
- ダイバータ運転領域と中心プラズマ運転領域の整合性の評価、発電に必要な密度上限値の明確化



まとめ

- 広範囲の運転領域に適用できる Core-SOL-Divertor (C-S-D) 簡易輸送モデルを構築した
- B2-EIRENEとの比較によりC-S-Dモデルの妥当性を確認.
- HT-7U のLHCDによる定常運転領域評価に適用しプラズマ密度 $n_e \sim 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ に運転可能領域が存在する事を示した.
- ITER とJT-60Uの LH 遷移過程に適用した結果, ダイバータ密度の振動現象がITERで観測される可能性があることを示した.
- 今後は実験データを用いたモデル検証作業を行い、コアプラズマと周辺プラズマの整合性評価に適用する予定.

参考文献

- [1] R. Hiwatari, et al., Plasma Performance Required for a Tokamak Reactor to Generate Net Electric Power, J. Plasma Fusion Res. 78(2002)991, R. Hiwatari, et al., To generate net electric power with a tokamak reactor under the foreseeable physical and engineering conditions, Nucl. Fusion, in press.
- [2] R. Hiwatari et al., “Simple-Core-SOL-Divertor Model TO Investigate Plasma Operational Space”, Contrib. Submitted to Contrib. Plasma Phys.
- [3] N. Uckan and ITER Physics Group, ITER Physics Design Guidelines: 1989
- [4] K. Borass, Nucl. Fusion 31(1991)1035, N. Hayashi, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 66(1997)3815.
- [5] ITER Physics Expert Groups, ITER Physics Basis Editors, Nucl. Fusion 39(1999)2175, T. Yamamoto, et al., Fusion Eng. Des. 39-40(1998)143
- [6] M. Sugihara, et al., J. Nucl. Mater. 241-243(1997)299, N. Hayashi, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 66(1997)3815.
- [7] K. Nagashima, et al., JAERI-RESEARCH-95-52 1995
- [8] A. Hatayama, et al., Nucl. Fusion 40(2000)2009, J. Nucl. Mater. 290-293(2001)407
- [9] M. Sugihara, et al., J. Nucl. Mater. 128-129(1984)114
- [10] T. Takizuka, et al., JAERI-RESEARCH2003-010 2003
- [11] K. Tuchiya, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 38(1996)1295
- [12] private communication with T. Takizuka (2003)