

JAERI-Research  
2000-037



JP0050853



JT-60Uにおける高密度ELMy Hモードプラズマの閉じ込め劣化

2000年10月

浦野 創\*・鎌田 裕・白井 浩・滝塚 知典  
井手 俊介・藤田 隆明・福田 武司

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

## JT-60U における高密度 ELMy H モードプラズマの閉じ込め劣化

日本原子力研究所那珂研究所 炉心プラズマ研究部  
浦野 創\*・鎌田 裕・白井 浩・滝塚 知典・井手 俊介・藤田 隆明・福田 武司

(2000 年 7 月 24 日受理)

JT-60U の H モードプラズマをコア部及びペDESTAL部に分離することによって、密度の増加による熱エネルギー閉じ込め性能低下の支配的な要因を解析した。実験は、NBI 入射パワー  $P_{\text{NBI}}$  を 4MW から 13 MW まで階段状に上昇させ、線平均電子密度  $\bar{n}_e$  は  $2.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  から  $4.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  まで放電毎に変化させた。これはグリーンワルド密度限界の 25% から 53% に対応する。また、 $I_p$ ,  $B_t$  及び  $q_{95}$  はそれぞれ 1.8 MA, 3.0 T 及び 2.9-3.1 で固定した。密度の増加に伴う熱エネルギー閉じ込め性能の低下は、高密度領域において熱エネルギー  $W_{\text{th}}$  が一定となるために起こる。ペDESTAL部の熱エネルギー  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  は、タイプ I の ELM の制約によって、密度の増加に対してほぼ一定に保たれるが、コア部の熱エネルギー  $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  もほぼ一定で変化しない傾向が見られた。性能が低下しない低密度領域で構築されたオフセット非線形比例則に基づく閉じ込め改善度を評価したところ、MHD 不安定性で決まるペDESTAL部に比べてジャイロボーム的輸送で支配されるコア部の性能低下が著しいことが分かった。高密度領域では、ペDESTAL肩の温度の低下に伴って、コア部の実効的熱拡散係数  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}}$  が増加する傾向が見られた。

## Confinement Degradation of High Density ELMy H-mode Plasmas in JT-60U

Hajime URANO\*, Yutaka KAMADA, Hiroshi SHIRAI, Tomonori TAKIZUKA,  
Shunsuke IDE, Takaaki FUJITA and Takeshi FUKUDA

Department of Fusion Plasma Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 24, 2000)

The dominant causes of the degradation of thermal energy confinement with an increase in plasma density were analyzed by separating the core and edge pedestal components in JT-60U H-mode plasmas. In a series of experiments, the neutral beam heating power  $P_{\text{NBI}}$  was scanned from 4 to 13 MW. The line-averaged electron density  $\bar{n}_e$  was varied on a shot by shot basis from  $2.4 \times 10^{19}$  to  $4.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , which corresponded to  $(0.25-0.53) \times n^{\text{GW}}$ . The other parameters were fixed at  $I_p : B_t : q_{95} = 1.8 \text{ MA} : 3.0 \text{ T} : 2.9-3.1$ . The degradation of the thermal energy confinement is attributed to the constancy of thermal stored energy  $W_{\text{th}}$  at a high density. As the density is raised, the thermal energy stored in the pedestal,  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$ , is kept almost constant because of the suppression of confinement by type-I ELMs. The core component  $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  also tends to remain almost constant over wide range of density. The enhancement factor of the core confinement, which is determined by the gyro-Bohm-like transport, remarkably decreases with density. At the high density, the effective thermal conductivity of core component  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}}$  tends to increase with decreasing temperature at the shoulder of the H-mode pedestal.

Keywords: ELMy H-mode, High  $\beta_p$  H-mode, Thermal Energy Confinement, Pedestal and Core Stored Energy

---

\* Graduate School of Engineering, Hokkaido University

## 目 次

1. 序論 .....	1
2. ELMy H モード運転領域 .....	2
3. ELM と熱エネルギー閉じ込め性能 .....	3
3.1 密度依存性 .....	4
3.2 ELM によるエネルギー損失 .....	6
3.3 周辺ペダスタル部とコア部の関連性 .....	7
4. 高 $\beta$ pH モードの熱閉じ込め特性 .....	10
5. 結論 .....	12
謝辞 .....	12
参考文献 .....	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Operation Regime of ELMy H-mode Discharge .....	2
3. ELMs and Thermal Energy Confinement. ....	3
3.1 Density Dependence .....	4
3.2 Energy Loss due to ELM Behavior .....	6
3.3 Relationship between Core and Edge Pedestal Confinement .....	7
4. Thermal Energy Confinement Properties of High $\beta_p$ H-mode Plasmas .....	10
5. Conclusions .....	12
Acknowledgements .....	12
References .....	13

# 1. 序論

Hモード[1]ではプラズマ表面近傍に急峻な輸送障壁が形成され、Lモードに比べて大きな閉じ込め改善が実現される。一方でHモードの放電では、表面近傍に大きな圧力勾配が形成されることから、Lモードでは見られなかった周辺輸送障壁に起因する不安定性ELM (Edge Localized Mode)が発生する[2-5]。この現象は、Hモードの放電ではほぼ必ず発生すると言ってよいほど一般的なものである。Hモードの定常運転のためには、プラズマの密度やヘリウム灰等の不純物混入量を制御する必要があるが、DIII-Dでは、プラズマ中に混入させたヘリウム不純物がELMによって有効に排出されることが示されている[6]。さらにELM-free Hモードに比べて定常化に適した放電形態であることから、国際熱核融合実験炉ITER[7-9]の設計ではELMy Hモード放電を想定している。しかし、トカマク炉において十分な核融合出力を得るためにはプラズマ中心部のエネルギー閉じ込め改善を伴った高密度領域での運転が必須であるが、プラズマの密度の増加とともにHファクターが減少する結果がJET[10]、ASDEX[11]及びJT-60U[12-14]で確認されている。この性能低下をもたらす主要な要因を探ることが、高閉じ込めHモードの領域拡大に不可欠である。Figure 1に本研究で解析を行ったELMy Hモード放電における熱エネルギー閉じ込め性能が密度( $\bar{n}_e$ :線平均電子密度,  $n^{GW}$ :グリーンワルド密度限界[15])の増加に伴って低下する様子を示す。この性能劣化の要因には、高密度を得るために重水素ガス注入を行うと、周辺プラズマの中性粒子圧力が増大し、その結果、主プラズマでの荷電交換損失が増大し、Hモードの閉じ込め改善を支えている電場の形成を阻害するためであるという考え方が可能性として挙げられている[12]。このモデルによると、プラズマの劣化は周辺部の熱エネルギー閉じ込め性能の低下によってもたらされる。そこで、JT-60UではW字型ダイバータを導入し、主プラズマとダイバータプラズマの独立性を高めるなどして、中性粒子の逆流を低減させてきた。しかし高密度領域での熱エネルギー閉じ込め性能の大きな改善は依然見られていない。実際、ELMが熱エネルギー閉じ込めに及ぼす影響は主に2つ挙げられる。1つは各ELMバーストによる周辺部からの直接的なエネルギー損失である。タイプIのELMy Hモードは定常運転に望ましいとされる一方で、加熱パワーの増加とともにELMの周波数が増加し、熱エネルギーの損失をもたらす。もう1つはELMの不安定性によって制限されるペDESTAL構造がコア部の熱閉じ込めへ及ぼす影響である。高三角度放電では、高い周辺圧力勾配が得られ、全体的なエネルギー閉じ込め改善が確認されている。三角度は直接周辺部に影響するので、この現象は周辺ペDESTAL構造がコア部の閉じ込めを決定していると考えられる。

本研究では、ELMy Hモード放電における密度の増加に伴う熱エネルギー閉じ込め性能の低下の要因を解析した。プラズマをコア部及びペDESTAL部に分類し、性能低下の支配的なファクターを明確にした。また、ELMy Hモード及びプラズマ内部に熱輸送障壁を伴う高 $\beta$ pHモード[16,17]におけるコア部の熱エネルギーのパワー依存性を比較し、障壁形成によるコア部とペDESTAL部の熱エネルギー閉じ込めの関連性を解析した。

## 2. ELMy H モード運転領域

プラズマ電流  $I_p=1.8\text{MA}$  での H モードの JT-60 放電実験を行った。この放電実験でのグリーンワルド密度限界は  $n^{GW}=(8.1-8.7)\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  に対応する。またトロイダル磁場  $B_t=3.0\text{T}$  及びプラズマ表面近傍(95%)における安全係数  $q_{95}=2.9-3.1$  である。中性粒子ビーム入射(NBI)パワー  $P_{\text{NBI}}$  はエネルギー閉じ込め性能のプラズマ加熱パワー依存性を調べるため、各放電において 4MW から 13MW まで階段状に入射した。また重水素ガスバフにより、線平均電子密度  $\bar{n}_e$  は、 $2.4\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  から  $4.5\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  まで放電毎に変化させた。この最大線平均電子密度は  $(0.50-0.53) \times n^{GW}$  になる。Figure 2 に本研究で解析を行った ELMy H モード放電(E33655)のプラズマ形状を示す。プラズマの楕円度  $\kappa$  は 1.48 から 1.55、また三角形度  $\delta$  は 0.16 から 0.19 の範囲で固定され、プラズマ体積  $V_p$  は  $60-63\text{m}^3$  である。大半径  $R_p$  及び小半径  $a_p$  はそれぞれ 3.24-3.25m, 0.81-0.85m の範囲にある。トロイダル磁場リップルによる高速イオンの損失パワーは NBI 入射パワー  $P_{\text{NBI}}$  の 9% から 15% であり、この損失はエネルギー閉じ込め性能の評価に用いられるプラズマ加熱パワー  $P_{\text{abs}}$  に考慮した。

次に、JT-60U の ELMy H モード放電における主なプラズマパラメータの時間発展を典型例として、Figure 3 に示す。高密度放電(E33655)では、中性粒子ビーム入射(NBI)パワーの増加によって、 $t=6.7\text{sec}$  で H モードへ遷移した。数百 msec にわたる ELM-free 相の後、Type III ELM が発生し、 $t=7.75\text{sec}$  を過ぎると、Type I ELM が出現した。 $\bar{n}_e$  は、NBI パワーの増加に伴って、 $3.0\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  から  $3.8\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  まで緩やかに上昇し、同時にプラズマ全体の蓄積エネルギー  $W_{\text{dia}}$  も 1.7MJ から 3.0MJ まで増加している。一方、低密度放電(E33638)では、 $\bar{n}_e$  が  $2.8\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  まで上昇するのと同時に、 $W_{\text{dia}}$  は 3.4MJ まで大きく増加し、高密度ほど低い値で飽和する傾向が見られる。Type I ELM の出現領域は、理想バルーニングモードの圧力限界に対応すると考えられ、他のタイプの ELM に対し、Type I の ELMy H モードは閉じ込め性能は高い反面、ELM ごとに吐き出されるエネルギーや粒子の量が大きく、プラズマ全体の 1-10% である[4]。次章では、Type I の ELMy H モードにおける熱エネルギー閉じ込め性能を中心部及びペダスタル部に分離したより詳しい議論を展開する。



### 3. ELM と熱エネルギー閉じ込め性能

NBI 加熱されたプラズマのエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  は、次式に示す 1 流体近似のエネルギーバランスの式から対流損失、熱伝導損失及び放射損失で決定されるエネルギーの損失時間として与えられる。全体の蓄積エネルギー  $W_{dia}$  は高速イオンの持つ蓄積エネルギー  $W_{fast}$  とサーマルの蓄積エネルギー  $W_{th}$  で構成されている。

$$\frac{dW_{dia}}{dt} = P_{abs} - \frac{W_{dia}}{\tau_E} \quad (1)$$

$$W_{dia} = W_{fast} + W_{th} \quad (2)$$

$$P_{abs} = P_{NBI} + P_{ohmic} - P_{sh} - P_{orbit} - P_{cx} - P_{ripple} \quad (3)$$

但し、 $P_{NBI}$  及び  $P_{ohmic}$  はそれぞれ NB 入射パワー及びオーミック加熱パワーでエネルギーバランスの式のソース項となる。また  $P_{sh}$ ,  $P_{orbit}$ ,  $P_{cx}$  及び  $P_{ripple}$  は高速イオンによる損失項として、それぞれ NB の突き抜けによるパワー損失、バナナ軌道損失、荷電交換損失及びトロイダル磁場によるリップル損失を表す。 $P_{ohmic}$  は 0.3-0.9MW で、 $P_{NBI}=13MW$  と比べて小さい。また、この放電実験における高速イオンによるリップル損失  $P_{ripple}$  は、 $\bar{n}_e$  が  $2.4 \times 10^{19} m^{-3}$  から  $4.5 \times 10^{19} m^{-3}$  に増加するのに伴い、 $P_{NBI}$  の 9% から 14% へと増加する。バナナ軌道損失  $P_{orbit}$  及び荷電交換損失  $P_{cx}$  は、それぞれ 0.2-1.3%, 2-7% ほどで小さい。式(1)から得られるエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  に対し、L モード放電における代表的な経験則として、ITER89P L-mode スケーリング則[18]がある。

$$\tau_E^{ITER89P-L} = 0.038 A_i^{0.5} I_p^{0.85} R_p^{1.2} a_p^{0.3} \kappa^{0.5} n_e^{0.1} B_i^{0.2} P_{abs}^{-0.5} \quad (4)$$

上式において、 $A_i$  は実効的質量数を表し、単位は順に、sec, amu, MA, m,  $10^{19} m^{-3}$ , T, MW である。本研究では、L モード放電に対するエネルギー閉じ込め改善度を評価するために式(4)を用いた。JT-60U では高速イオンとは、プラズマに入射される 85-90keV のエネルギーから 1.5T 以上のエネルギーを持つイオンとして定義されている。 $W_{fast}$  は中性粒子ビーム(NB)エネルギー、プラズマの電子温度及び密度によって変化する。プラズマの熱エネルギー閉じ込め特性を解析するためには、高速イオンの持つ蓄積エネルギー  $W_{fast}$  とサーマルの蓄積エネルギー  $W_{th}$  はそれぞれ分類して扱う必要がある。JT-60 及び JT-60U では、NB 入射を伴う L モード放電における熱エネルギー閉じ込め時間  $\tau_{th}$  の経験則[19,20]を導出している。

$$\tau_{th}^{L(JT-60U)} = 0.026 A_i^{0.3} I_p^{0.5} R_p^{1.44} a_p^{0.93} \kappa^{0.87} n_e^{0.5} B_i^{0.39} P_{abs}^{-0.67} \quad (5)$$

また第 1 章で述べたように、ITER での標準運転モードとして ELMy H モードが採用されていることから、様々な閉じ込めデータベース[21-24]が構築され、解析が進んでいる。ITER の閉じ込め予測としては、ITER89P L-mode スケーリング則と同様に、最も単純である Log 線形モデルをベースに解析が進められている。しかし、H モードはプラズマ境界の狭い領域に輸送障壁が形成され、境界全体が嵩上げされる改善閉じ込めモードであることから、輸送障壁部を分離して考える解析手法の方が実験結果を反映していると考えられ、輸送障壁部は MHD 安定性で決定され、コア部分はジャイロボーム的輸送で決まるとしたオフセット非線形スケーリング則[23]が提案されている。

$$\tau_{th}^{ONL} = 0.082 \kappa R_p I_p B_i b^{-0.1} P_{abs}^{-1.0} + 0.043 R_p^{1.3} a_p^{0.6} I_p^{0.6} n_e^{0.6} b^{-0.15} P_{abs}^{-0.4} \quad (6)$$

但し,  $b \equiv B_i R_p^{1.25}$  である. 式(6)では, 第1項がMHD安定性でできるペDESTAL部を表し, 第2項がプラズマコア部を表している.

本研究では, 高速イオン及び熱化プラズマの輸送解析には, 粒子軌道追跡モンテカルロ(OFMC)コード[25]及びトカマクプラズマ予測解析コードシステム(TOPICS)[19]をそれぞれ用いた. 電子密度  $n_e$  は YAG レーザートムソン散乱測定によって測定し, 電子温度  $T_e$  は YAG レーザートムソン散乱測定及び回折格子電子サイクロトロン放射光測定によって測定した. またイオン温度  $T_i$  はポロイダル系及びトロイダル系の荷電交換再結合分光(CXRS)法によって測定し, 実効的電荷数  $Z_{\text{eff}}$  は, 制動放射光測定, 電子温度  $T_e$  及び電子密度  $n_e$  の値に基づいて, 中性子発生率  $S_n$  の測定値を満たすように, 空間的に一様に分布すると仮定して決定した.

### 3.1. 密度依存性

Figure 1 に示したように, Type I ELM 相では, プラズマ密度の上昇に伴って, ELMy H モードプラズマの H ファクターが減少する. Figure 1 において,  $\bar{n}_e/n^{\text{GW}}$  が 0.30 から 0.53 まで増加するのに伴い, 熱プラズマの H ファクター  $H_{\text{th}}^{\text{L}(JT-60U)} (= \tau_{\text{th}}/\tau_{\text{th}}^{\text{L}(JT-60U)})$  は 1.6 から 1.0 へと減少する. Figure 4(a) に  $P_{\text{NBI}}=13.0\text{MW}$  における  $W_{\text{fast}}$ ,  $W_{\text{th}}$  及び  $W_{\text{dia}}$  の密度依存性を示す. Type I ELM 発生時には, 線平均電子密度  $\bar{n}_e$  が  $2.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  から  $4.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  まで増加すると,  $W_{\text{dia}}$  及び  $W_{\text{fast}}$  はそれぞれ 3.5MJ から 2.5MJ, 0.9MJ から 0.3MJ まで減少する. 一方,  $W_{\text{th}}$  は,  $\bar{n}_e$  が  $2.9 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  に増加するまでは 2.2MJ から 2.4MJ まで増加するが, さらに高密度では, 2.0MJ まで次第に減少した.  $W_{\text{fast}}$  は高速イオンのエネルギー緩和時間に比例するため, 次式に示すように電子密度に逆比例する.

$$W_{\text{fast}} \propto \frac{T_e^{3/2}}{n_e} \quad (7)$$

また,  $W_{\text{th}}$  に関して, 電子系及びイオン系に分類した密度依存の様子を Figure 4(b) に示す. Type I ELM 時における電子の熱エネルギー  $W_{\text{th}}^{\text{electron}}$  及びイオンの熱エネルギー  $W_{\text{th}}^{\text{ion}}$  はそれぞれ 1.1-1.3MJ 及び 0.9-1.1MJ の範囲にある. このとき,  $W_{\text{th}}^{\text{ion}}$  は  $W_{\text{th}}$  の 41-49% を占める.

次に熱エネルギー閉じ込め時間  $\tau_{\text{th}}$  及び全体のエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  の密度依存性に関して両者を比較したグラフを Figure 5 に示す. ここで, 熱エネルギー閉じ込め時間  $\tau_{\text{th}}$  は次式に示す熱プラズマに対するエネルギーバランスの式から導出される.

$$\frac{dW_{\text{th}}}{dt} = P_{\text{abs}} - \frac{W_{\text{th}}}{\tau_{\text{th}}} \quad (8)$$

$$W_{\text{th}} = \frac{3}{2} k_B \int_V \sum_j n_j(r) T_j(r) dV_p \quad (9)$$

但し, イオンの密度分布  $n_i(r)$  は電子密度分布  $n_e(r)$  及び実効的電荷数  $Z_{\text{eff}}$  から算出した.  $P_{\text{NBI}}=13.0\text{MW}$  の下で, 低密度領域 ( $\bar{n}_e=(2.7-2.9) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ) では,  $\tau_E$  及び  $\tau_{\text{th}}$  はそれぞれ 0.33sec から 0.38sec, 0.23sec から 0.25sec まで増加した. 一方, 高密度側 ( $\bar{n}_e=(2.9-4.5) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ) では,  $\tau_E$  及び  $\tau_{\text{th}}$  はそれぞれ 0.38sec から 0.24sec, 0.25sec から 0.19sec まで次第に減少した. 従って, 密度の増加に伴って,  $W_{\text{th}} (= \text{const.})$  を維持するために必要なパワーは増加することが分かる. 次に, 熱プラズマをコア部及びペDESTAL部に分類することによって,  $\tau_{\text{th}}$  の低下がいずれの劣化によってもたらされるのかを調べた. ELMy H モード時における密度の異なる 2shot ( $P_{\text{NBI}}=13.0\text{MW}$ ) の電子密度分布, 電子温度分布及びイオン温度分布を Figure 6(a) 及び (b) に示す. 密度の増加に伴って, 電子温度及びイオン温度が

全体的に低下することが分かる。また、ペDESTAL部の温度は電子系に比べて、イオン系の方がより顕著に減少し、高密度側ほど  $T_i^{\text{ped}}$  は  $T_e^{\text{ped}}$  に近づいている。また中心温度でもイオン系の方の減少が顕著である。これは1つに、高密度ではNBのパワーデポジションピークがプラズマの周辺部側にシフトするためである考えられる。また、イオン加熱主体の領域であることから、電子—イオン間のエネルギー緩和に要するパワー(equi-partition power)が、密度とともに増加することが挙げられる。なお、本研究では、Figure 6(c)に示すように、ペDESTAL肩の位置  $r_{\text{ped}}$  をイオン温度分布から決定した。YAGレーザートムソン散乱による電子温度測定は、それ自身でペDESTAL肩を判断するのに十分な空間分解能を備えていなく、特に低密度領域では、測定誤差が大きいいため、 $T_e^{\text{ped}}$  は Figure 6(d)に示すように、比較的高密度であるプラズマ内部からの線形フィッティングによって決定した。次に、Figure 7に、ペDESTAL電子密度  $n_e^{\text{ped}}$ 、中心電子密度  $n_e(0)$ 、ペDESTAL電子温度  $T_e^{\text{ped}}$ 、ペDESTALイオン温度  $T_i^{\text{ped}}$ 、中心電子温度  $T_e(0)$  及び中心イオン温度  $T_i(0)$  の線平均電子密度  $\bar{n}_e$  に対する依存性を示す。 $n_e^{\text{ped}}$  及び  $n_e(0)$  はそれぞれ  $1.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  から  $3.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $2.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  から  $5.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  まで  $\bar{n}_e$  に比例して上昇している。また、温度については、低密度で内部輸送障壁が形成された放電を除くと、Type I ELM時における  $T_e^{\text{ped}}$  及び  $T_i^{\text{ped}}$  はそれぞれ 1.6keV から 0.8keV、2.8keV から 1.0keV まで減少する。次節で議論するが、これはペDESTAL部の温度が、ELMの圧力限界によって決定されているためであると考えられる。一方、 $T_e(0)$  は密度の増加とともに約 3keV 減少しているのに対し、 $T_i(0)$  は約 6keV 減少し、次第に  $T_e(0)$  に近づいている。

本研究では、ペDESTAL熱プラズマの蓄積エネルギー  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  を密度及び温度の空間分布から評価することで、 $W_{\text{th}}$  をコア部とペDESTAL部に分離して、それらの閉じ込め特性を調べた。Figure 8(a)に  $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  と  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  の密度依存性を示す。但し、 $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  及び  $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  は次式に従って導出した。

$$W_{\text{th}}^{\text{ped}} = \frac{3}{2} k_B \int_{V_p} \sum_j n_j^{\text{ped}} T_j^{\text{ped}} dV_p \quad (9)$$

$$\approx \frac{3}{2} \sum_j n_j^{\text{ped}} k_B T_j^{\text{ped}} \cdot 2\pi R_p \cdot \pi a_p^2 \kappa$$

$$W_{\text{th}}^{\text{core}} = W_{\text{th}} - W_{\text{th}}^{\text{ped}} \quad (10)$$

NB入射パワーが一定 ( $P_{\text{NBI}}=13.0\text{MW}$ ) の下で、 $\bar{n}_e$  が  $2.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  から  $4.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  まで増加するのに伴って、 $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  及び  $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  はそれぞれ 0.8-0.9MJ、1.2-1.5MJ の範囲でほぼ一定である。但し、NB入射による粒子補給のみの低密度領域 ( $\bar{n}_e=(2.7-2.9) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ) では、 $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  が密度とともに増加しているのが分かる。次に、コア部及びペDESTAL部の熱エネルギー閉じ込め改善度を Figure 8(b)に示す。但し、これらの  $H_{\text{H}}$  ファクターの導出には、式(6)に示す各部に分離されたオフセット非線形スケーリング則を用いた。 $\tau_{\text{th}}^{\text{ONL}}$  の表式に従い、各部の熱エネルギー閉じ込め時間を次式のように定義した。

$$\tau_{\text{th}}^{\text{ped}} \equiv \frac{W_{\text{th}}^{\text{ped}}}{P_{\text{abs}}} \quad (11)$$

$$\tau_{\text{th}}^{\text{core}} \equiv \frac{W_{\text{th}}^{\text{core}}}{P_{\text{abs}}} \quad (12)$$

ペDESTAL部の  $H_{\text{H}}$  ファクターは、密度の増加とともに 0.7 から 0.5 へ緩やかに減少する一方、プラズマコア部の  $H_{\text{H}}$  ファクターは 1.3 から 0.8 まで減少し、ペDESTAL部に対して、コア部の熱エネルギー閉じ込め性能の低下は著しい。なお、後述するが、低三角度

のプラズマの場合、 $H$  (ONL-Pedestal)が低い値を示す。また、本研究では空間分布から直接ペデスタルを決定しているのに対し、 $W_{th}$ のオフセット分として決定したITERの閉じ込めデータベースによると、 $H$  (ONL-Pedestal) $\approx 0.75$ と予測していることを述べておく。次節では、ELM発生状態におけるペデスタル部とコア部の熱閉じ込め性能の相関を議論し、コア部の性能低下の支配的な要因を探る。

## 3.2. ELMによるエネルギー損失

各々のELMのバーストは、約100 $\mu$ sec程度の現象で、その周波数は数Hzから数100Hzで、加熱パワー等とともに変化する。Figure 9に、本研究で解析を行ったELMy Hモード放電における吸収パワー $P_{abs}$ に伴うELM周波数 $f_{ELM}$ の変化の様子を示す。ELMごとに吐き出されるエネルギーや粒子の量が大きなType I ELMは、加熱パワーがL/H遷移に必要な値よりも十分大きな領域で発生し、このときのELM周波数 $f_{ELM}$ は吸収パワーとともに増加する[26]。これはプラズマ電流 $I_p$ またはポロイダル磁場 $B_p$ を大きくすることにより減少させることができる。一方、加熱パワーがL/H遷移に必要な閾値を若干超えたあたりで発生するType III ELMは、低パワーで高い周波数を持ち、Type I ELMとは逆に加熱パワーとともに減少する。これは加熱パワーの増加に伴う周辺電子温度の上昇によって、ELMが安定化されるためであると考えられている[27]。Figure 3に示した高密度放電では、 $t=7.8$ secにType I ELMが出現してから $W_{dia}$ は完全に飽和する。Type IIIからType Iにかけて、 $H_{th}^{L(JT-60U)}$ は1.1から1.2まで変化するが、Hファクターの上昇率は小さい。一方、低密度放電では、 $P_{NBI}$ の増加とともに $H_{th}^{L(JT-60U)}$ は1.0から1.4まで上昇する。Figure 10に上記の2放電における $W_{dia}$ のプラズマが吸収する正味のパワー $P_{net}$  ( $=P_{abs}-dW_{dia}/dt$ )に対する依存性を示す。Figure 10(a)に示す高密度放電(E33655)では、NB入射からしばらくの間、Lモードによるパワーデグラデーションが確認できるが、 $P_{net}=3.5$ MWでL/H遷移( $t=6.6$ sec)が起こり、エネルギー閉じ込め性能が向上した。続いて、約0.2secにわたるELM-free相の後、 $t=6.8$ secでType IIIの領域に入った。Type III相では、ELM-free相に比べて、性能は劣化するが、蓄積エネルギーは加熱パワーの増加とともに次第に増加することが分かる。この放電では、 $t=7.6$ secでELM-free相に入り、一時的に性能が向上するが、 $t=7.75$ secでType I ELMの圧力限界に到達し、加熱パワーの増加に対して、蓄積エネルギーは完全に飽和した。一方、Figure 10(b)に示す低密度放電(E33638)では、Type I相での $W_{dia}$ の飽和値が高いことが分かる。これは前節で述べたように、低密度の方が高速イオンの蓄積エネルギー $W_{fast}$ を大きく保つことができるからである。また、Type III相では、 $P_{net}$ が約3MWから7MWまで増加する間に、 $W_{dia}$ が1.6MJから2.7MJまで増加するのに対し、高密度放電では、1.4MJから2.2MJまでしか伸びていない。 $P_{net}=7$ MWにおける高密度放電の $W_{fast}$ は0.4MJであるのに対し、低密度放電では0.7MJである。

Type III ELMは、プラズマをさらに低密度にすると完全に消滅(ELM-free)する。Figure 11に示す放電(E33662)は、 $\bar{n}_e$ が $(1.3-2.7)\times 10^{19} m^{-3}$ の低密度プラズマであるが、L/H遷移後、 $t=7.7$ secに最初のELMバーストが出現するまで、ELM-free状態が続いた。 $t=7.52$ secにおける $\tau_E$ は0.62secと高いエネルギー閉じ込め性能を示している。Figure 12に、Type I ELM及びType III ELMの出現領域をペデスタル部の電子温度 $T_e^{ped}$ 及び電子密度 $n_e^{ped}$ で表した図を示す。図中(i)で示す矢印は、Figure 3で示した高密度放電(E33655)を表している。L/H遷移後、加熱パワーの増加とともにペデスタル部の密度及び温度がともに上昇し、まず

Type III の領域に入り、さらに温度を上げていくと Type I ELM が出現する。Type I 相では、 $n_e^{\text{ped}}$  が増加しても、 $T_e^{\text{ped}}$  が低下し、ペデスタル部の圧力をほぼ一定に保つ。一方、図中(ii)で示す矢印は、Figure 11 に示した放電(E33662)を表す。非常に低い密度で H モード化したことにより、Type I ELM が出現するまで、加熱パワーを増加させても ELM-free 相を持続させ、Type III の領域を完全に回避している。

高密度領域でのエネルギー閉じ込め性能低下の要因を探るためには、ELM によるエネルギー吐き出しの物理機構を明らかにすることが極めて重要である。そこで次に、高密度(E33640;  $\bar{n}_e = 3.9 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ )及び低密度(E33637;  $\bar{n}_e = 2.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ )放電における ELM の挙動に対する蓄積エネルギー  $W_{\text{dia}}$  の変化の相違を Figure 13 に示す。両者は同じ加熱パワー( $P_{\text{NBI}} = 10.5\text{-}13.0\text{MW}$ )であるが、密度の高い方が ELM の周波数  $f_{\text{ELM}}$  が高く、1 回の ELM のバーストで失われる粒子の量も多い傾向が見られる。一方、ELM 毎に失われる蓄積エネルギー  $\Delta W_{\text{ELM}}$  は低密度の方が大きい傾向が見られる。実際、反磁性ループで測定した  $\Delta W_{\text{ELM}}$  を 13.0MW の NB 入射時の各バーストについて平均化すると、高密度放電では 26kJ であるのに対し、低密度放電では 39kJ である。但し、反磁性ループ測定の時間分解能( $\approx 10\text{msec}$ )は ELM の挙動を解析するのに決して十分ではなく、各 ELM のバースト毎に蓄積エネルギーの急激な減少が起こっていると考えると、測定された  $\Delta W_{\text{ELM}}$  の値はファクター 2-3 過小評価されている可能性がある。ELMy H モード時におけるペデスタル幅  $\Delta r$  及び周辺部の規格化圧力勾配  $\alpha$  の  $n_e^{\text{ped}}$  に対する依存性を Figure 14(a)及び(b)に示す。ここで、ペデスタル幅  $\Delta r$  はセパトトリックスの位置  $r_{\text{sep}}$  とペデスタル肩の位置  $r_{\text{ped}}$  の間の距離として定義した。また、 $\alpha$  はセパトトリックスでの圧力は 0 であるとして導出した。 $n_e^{\text{ped}}$  が 2 倍増加するのに伴って、 $\alpha$  はファクター 2 増加する。次に、周辺圧力勾配  $dp/dr$  を持つ厚さ  $\Delta r$  の領域の蓄積エネルギーを  $\Delta W_{\text{ped}}$  とし、 $\Delta W_{\text{ped}}$  の  $\bar{n}_e$  依存性を Figure 14(c)に示す。

$$\Delta W_{\text{ped}} = \frac{3}{2} k_B \int_{V_{\text{ped}}} \sum_j n_j(r) T_j(r) dV_p \approx 3\pi^2 R_p r_{\text{ped}} \cdot P_{\text{ped}} \Delta r \quad (13)$$

但し、上式において、 $P_{\text{ped}}$  はペデスタル肩における圧力、また  $V_{\text{ped}}$  はペデスタル肩外側のプラズマ体積を表す。ペデスタル幅  $\Delta r$  が密度の増加に伴って減少するため、 $\Delta W_{\text{ped}}$  が密度とともに減少する。ELM のバースト時には、ペデスタル幅  $\Delta r$  の領域の磁力線構造が破壊され、その領域の蓄積エネルギー  $\Delta W_{\text{ped}}$  が放出されると考えると、 $\Delta W_{\text{ped}}$  及び  $\Delta W_{\text{ELM}}$  の密度依存の傾向は互いに符合している。しかし、このモデルでは、ELM の挙動によって、コア部の蓄積エネルギーが失われているとは考えにくい。急峻な圧力勾配が不安定性の駆動源であるとすれば、周辺部における圧力分布の崩壊が、雪崩的に中心方向へ伝わることも考えられる。実際、H/L 遷移によって発生した周辺部の温度低下が、熱拡散時間よりもはるかに短い時間尺度で、中心部の温度低下をもたらす[28,29]ことが報告されていることから、ELM は単に周辺プラズマに局在した現象ではなく、コア部のプラズマとの間に大きな輸送構造があると考えられる。

### 3.3. 周辺ペデスタル部とコア部の関連性

Figure 12 に示したように、Type I ELM 相では、 $n_e^{\text{ped}}$  と  $T_e^{\text{ped}}$  は互いに対応して変化するので、高密度領域での閉じ込め性能の劣化は低いペデスタル温度という条件に関連していると考えられる。Figure 15 に Type I ELM 相における  $H_{\text{th}}^{\text{L}(JT-60)}$  の  $T_e^{\text{ped}}$  及び  $T_i^{\text{ped}}$  に対する依存性を示す。低いペデスタル温度領域では、 $H_{\text{th}}^{\text{L}(JT-60)}$  は各系のペデスタル温度の増

加に伴って次第に増加するが、一方で高温では、閉じ込めが次第に飽和に向かうことが分かる。この飽和領域は、Figure 8(a)で示した  $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  が密度とともに増加する NB 入射による粒子補給のみの低密度領域に対応している。ペDESTAL部の熱エネルギー閉じ込め性能  $H$  (ONL-Pedestal) はオフセット非線形スケーリング則から予測されるように密度依存性がないので、Figure 15 における  $H_{\text{th}}^{\text{L(JT-60)}}$  の変化は主にコア部の性能の変化によるものと考えられる。実際のところ、 $H$  (ONL-Core) と  $T_{\text{i}}^{\text{ped}}$  の間には強い相関が見られるが、 $H$  (ONL-Pedestal) の変化は小さい (Figure 16 参照)。  $T_{\text{i}}^{\text{ped}}$  が 1.0keV から 2.2keV まで増加するのに伴って、 $H$  (ONL-Core) は 0.8 から 1.3 まで増加する。ガスパフによる粒子補給のない高いペDESTAL温度領域 ( $T_{\text{i}}^{\text{ped}} \geq 2.2\text{keV}$ ) では、 $H$  (ONL-Core) は 1.1-1.3 の範囲でほぼ一定に保たれる。そして、さらに高温では ITB 形成によってコア部の性能は上昇する。本研究では、コア部における実効的熱拡散係数  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}}$  を用いて、ペDESTAL構造がコア部の輸送に及ぼす影響を評価した。

$$\chi_{\text{eff}}^{\text{core}} = - \frac{Q_{\text{core}}}{\sum_j n_j \nabla T_j} \quad (14)$$

但し、上式において、 $Q_{\text{core}}$  は半径  $r_{\text{ped}}$  のトーラス面を横切る熱流束を表し、また温度勾配  $\nabla T$  はコア部の輸送を決める特性的な量として、中心温度  $T(0)$  と H モードによって嵩上げされた温度  $T^{\text{ped}}$  の差  $\Delta T(0) (\equiv T(0) - T^{\text{ped}})$  から導出した。

$$Q_{\text{core}} = \frac{P_{\text{abs}} - dW/dt}{4\pi^2 R_p r_{\text{ped}}} \quad (15)$$

$$\sum_j n_j \nabla T_j \approx \sum_j n_j \frac{\Delta T_j(0)}{r_{\text{ped}}} \quad (16)$$

Figure 17(a) 及び (b) に、それぞれ Type I ELM 時における  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}}$  の  $\tau_{\text{th}}$  及び  $T_{\text{i}}^{\text{ped}}$  に対する依存性を示す。  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}} \propto 1/\tau_{\text{th}}$  が確認できることから、熱拡散係数の評価が妥当であることが分かる。また、Figure 17(b) の結果が示すように、低いペDESTAL温度領域においては、 $T_{\text{i}}^{\text{ped}}$  の増加とともに  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}}$  は減少する傾向がある。実際、H モードにおけるエネルギー閉じ込め性能はペDESTAL肩の温度  $T^{\text{ped}}$  に強く依存するという報告がある [11,14,30-32]。 Figure 7(a) 及び Figure 12 で示したように、密度の増加とともに  $n_e^{\text{ped}}$  が増加するが、同時に MHD 安定性の制約によって、ペDESTAL肩の温度は低下することから、密度が高いほど性能が劣化するという結果に到達する。このことから、ペDESTAL部の温度はコア部の熱エネルギー閉じ込めを決定する境界条件としての役割を果たすと考えられる。しかしながら、 $T^{\text{ped}}$  自体が周辺圧力勾配、ペDESTAL幅及びプラズマ密度等に依存するため、各々の因果関係を解明する必要がある。

以上の結果から、ELM によって制限される  $P_{\text{ped}}$ 、または  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  を高くとることができれば、高密度領域であっても、高いペDESTAL温度が得られ、その結果、コア部の熱拡散係数が減少し、閉じ込め性能の向上が期待できる。本研究で対象とした一連の放電は配位を低三角度で固定していたが、高三角度化によって、ペDESTAL幅及び  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  を大きくとることができ、 $H$  (ONL-Pedestal) の値は増加する (Figure 18 参照) [33]。

ELMy H モード放電の熱エネルギー閉じ込め特性として、まず密度の増加に伴う全体の蓄積エネルギー  $W_{\text{dia}}$  の減少は、高密度ほど高速イオンは容易に熱化するが、同時にサーマルの蓄積エネルギー  $W_{\text{th}}$  が増加しないことが原因である。さらに、この  $W_{\text{th}}$  を維持するために必要なパワー  $P_{\text{abs}}$  は密度とともに増加し、 $\tau_{\text{th}}$  が減少する。ペDESTAL部の蓄積エネルギー  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  は MHD 安定性の制約によって、密度によらずほぼ一定に保たれるが、

安定性の制約が関与していないと思われるコア部の蓄積エネルギー  $W_{th}^{core}$  も密度に対して増加せず、ペDESTAL部に比べてコア部の熱閉じ込め性能劣化は顕著である。コア部における実効的熱拡散係数  $\chi_{eff}^{core}$  はペDESTAL温度の増加とともに減少する傾向が見られた。

## 4. 高 $\beta$ pH モードの熱閉じ込め特性

ITER では、ELMy H モード運転による自己点火の検討の他、内部輸送障壁(以下 ITB)を伴う閉じ込め改善モードを用いた運転がコスト削減の観点から望まれる。JT-60U では、プラズマ周辺部を ELMy H モード化させ、コア部に熱障壁を伴う高 $\beta$ pH モード放電によって、大きな加熱入力の下で、炭素不純物や粒子リサイクリングの増加なしに高い性能を長時間維持している。前章までに述べたように、H モードにおける熱エネルギー閉じ込め性能は周辺部とコア部の密接な関連によって決まる傾向が見られたが、ITB の形成はその関係を分断し、コア部の熱エネルギーの成長に自由度を与えると考えられる。本章では、高 $\beta$ pH モードの熱エネルギー閉じ込め特性の加熱パワー依存性をコア部及びペデスタル部の相関も含めて議論する。

本研究では、プラズマ電流  $I_p=1.0\text{MA}$  における高三角度配位( $\delta = 0.43-0.51$ )の高 $\beta$ pH モード放電の解析を行った。Table 1 に各放電における主なプラズマパラメータを示す。トロイダル磁場  $B_t$  及び  $q_{95}$  はそれぞれ 2.1-3.6T, 3.5-6.1 と放電によって異なり、広い範囲を持つ。Figure 19(a)及び(b)は、それぞれ ITB が不明瞭(E32519)及び ITB 形成(E32520)の放電における主なプラズマパラメータの時間発展の様子を示す。これらの放電では NB 入射パワー  $P_{\text{NBI}}$  を 4MW から 15MW まで階段状に上昇させている。E32519 では、L/H 遷移に伴い、 $\bar{n}_e$  が  $1.5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  から  $1.7 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  へ増加した後、ほぼ一定となる。また全体の蓄積エネルギー  $W_{\text{dia}}$  は 0.6MJ から 2.0MJ まで緩やかに増加した。一方、E32520 は、 $t=8.6\text{sec}$  に ITB が形成されている。それまで  $\bar{n}_e$  は  $(1.7-1.9) \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  でほぼ一定であったが、ITB 形成に伴い、 $2.5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  まで増加した。また  $W_{\text{dia}}$  も ITB の形成により上昇し、放電を通じて 0.8MJ から 2.6MJ まで増加した。H ファクターは、E32519 では、L/H 遷移後 1.5 から 1.9 まで緩やかに増加したのに対し、E32520 では、1.5 から 2.3 まで増加した。また  $t=8.6\text{sec}$  から ELM の挙動が小さくなっている(Grassy ELM)ことに注意したい。これは ITB の形成によって、ポロイダルベータ値が上昇し、周辺部の安定性が改善されたためであると考えられる。Figure 20(a)及び(b)に、それぞれ上記の 2 放電における  $W_{\text{dia}}$  の  $P_{\text{net}}$  に対する依存性を示す。E32519 は加熱パワーの増加とともに蓄積エネルギーが次第に飽和する様子が確認できるが、一方で E32520 では、ITB が形成されたことによって、顕著な蓄積エネルギーの飽和が見られず、高い性能を維持していることが分かる。次に、この 2 放電における電子密度分布、電子温度分布及びイオン温度分布を Figure 21 に示す。高 $\beta$ pH モードでは、主にイオン系の閉じ込めが著しく改善されるが、電子系にも熱障壁が確認されることもある。Figure 22(a)に、高 $\beta$ pH モードにおける熱エネルギー  $W_{\text{th}}$  の加熱パワー依存性を示す。ITB が不明瞭な放電(E32519)では、加熱パワー  $P_{\text{abs}}$  の増加( $P_{\text{abs}}=5-10\text{MW}$ )とともに  $W_{\text{th}}$  が 0.55MJ から 0.75MJ へ緩やかに増加しながら飽和に向かう。一方、ITB を伴う他の放電では、 $P_{\text{abs}}=8\text{MW}$  から、 $W_{\text{th}}$  が 0.8MJ から 1.3MJ まで増加し、高い熱エネルギー閉じ込め性能を示す。高 $\beta$ pH モードの ITB 形成条件としては、トロイダル磁場  $B_t$  の依存性が弱いため、 $B_t$  によらず、ほぼ同じ加熱パワーで熱障壁が形成されていることが分かる[34]。また、Figure 22(b)に、 $W_{\text{th}}^{\text{core}}$  及び  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  の加熱パワー依存性を示す。ITB 形成によってコア部の性能が大きく改善されていることが明らかである。また、障壁が形成されている場合には、ペデスタル部の  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  も増加する傾向がある。ここで、障壁が不明瞭な放電(E32519)の  $W_{\text{th}}^{\text{ped}}$  が、他の放電と比較して低い値を示していることに注意したい。次



に、 $W_{th}^{ped}$  及び  $W_{th}^{core}$  の相関を Figure 23 に示す。ITB の形成により、ポロイダルベータ値が上昇し、シャフラノフシフトが大きくなったために、バルーニングモードが安定化に向かい、結果として周辺圧力及び  $W_{th}^{ped}$  が増加したと考えられる。また同時に、高三角度のプラズマであることから、周辺部の圧力勾配を高く保つことができ、 $W_{th}^{ped}$  が増加したことも理由に挙げられる。周辺部の圧力を高くとることが明瞭な ITB を形成するための十分条件であるかどうかは更なる議論を要する。

## 5. 結論

国際協力により設計活動が進められている国際熱核融合実験炉 ITER における標準運転モードとして採用されている ELMy H モードにおける高密度領域での熱エネルギー閉じ込め性能低下の要因を調査した。JT-60U における ELMy H モードの放電実験は、 $I_p$ 、 $B_t$  及び  $q_{95}$  がそれぞれ 1.8 MA, 3.0 T 及び 2.9-3.1 の下で行われた。密度の増加に伴うエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  の減少は、高密度ほど高速イオンは容易に熱化するのに対し、同時にサーマルの蓄積エネルギー  $W_{th}$  が増加しないことが原因である。さらに、この  $W_{th}$  を維持するために必要なパワー  $P_{abs}$  は密度とともに増加し、結果として熱エネルギー閉じ込め時間  $\tau_{th}$  が減少する。また、プラズマをコア部及びペDESTAL部に分類することによって、密度とともに  $W_{th}$  が増加しない原因を調査した。ペDESTAL部の蓄積エネルギー  $W_{th}^{ped}$  は MHD 安定性の制約によって、密度によらずほぼ一定に保たれるが、安定性の制約が関与していないと思われるコア部の蓄積エネルギー  $W_{th}^{core}$  も密度に対して増加せず、ペDESTAL部に比べてコア部の熱エネルギー閉じ込め性能の低下が著しいことが明らかとなった。さらに、コア部における実効的熱拡散係数  $\chi_{eff}^{core}$  はペDESTAL肩の温度の増加とともに低減される傾向が見られ、ペDESTAL構造がコア部の熱輸送を決定する境界条件としての重要な役割を果たすことが分かった。最後に内部輸送障壁を伴う高 $\beta$ pHモードの熱エネルギー閉じ込め性能の加熱パワー依存性を調べた。ある加熱パワーを超えると、ITB が形成され、コア部の蓄積エネルギー  $W_{th}^{core}$  は著しく増加するが、同時にペDESTAL部の蓄積エネルギー  $W_{th}^{ped}$  も明瞭な ITB を伴わない放電に比べて増加する傾向が見られた。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたっては、日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部の二宮博正博士、牛草健吉博士、三浦幸俊博士ならびに北海道大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻の板垣正文教授に貴重な助言と多くの激励をして頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また、本研究の詳細に至る度重なる議論に参加して下さいました独国マックスプランク研究所 ITER 共同中央チーム(JCT)の G. Janeschitz 博士、M. Sugihara 博士、Yu. Igitkhanov 博士、日本原子力研究所那珂研究所の波多江仰紀氏、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所の D. R. Mikkelsen 博士に深く御礼申し上げます。

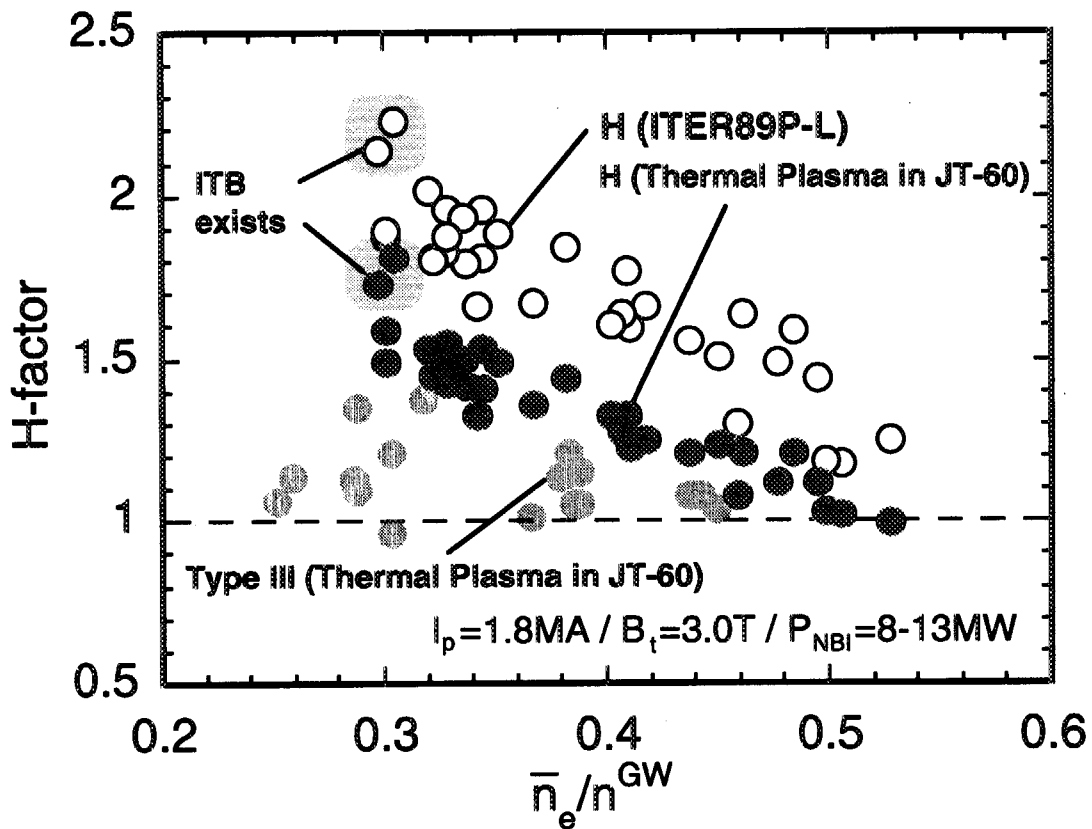
## 参考文献

- [1] ASDEX team: Nucl. Fusion **29** (1989) 1959.
- [2] H. Zohm: Plasma Phys. Control. Fusion **38** (1996) 105.
- [3] H. Zohm: Plasma Phys. Control. Fusion **38** (1996) 1213.
- [4] J. W. Connor: Plasma Phys. Control. Fusion **40** (1996) 191.
- [5] J. W. Connor: Plasma Phys. Control. Fusion **40** (1996) 531.
- [6] D. L. Hillis et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **36** (1994) A171.
- [7] ITER-JCT and Home Teams: Plasma Phys. Control. Fusion **37** (1995) 140.
- [8] ITER Physics Expert Groups, ITER Physics Basis Editors, ITER Joint Central Team, and Home Teams (presented by D. J. Cambell): Proc. 17th Int. Conf. on Fusion Energy 1998, Yokohama (Vienna: IAEA) vol **3** (1999) 931.
- [9] Y. Shimomura et al.: Nucl Fusion **39** (1999) 1295.
- [10] JET Team: Nucl. Fusion **39** (1999) 1687.
- [11] W. Suttrop, F. Ryter and V. Mertens et al.: Proc. 17th Int. Conf. on Fusion Energy 1998, Yokohama (Vienna: IAEA) vol **2** (1999) 777.
- [12] N. Asakura et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **39** (1997) 1295.
- [13] Y. Kamada et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **41** (1999) B77.
- [14] H. Urano et al.: submitted to Plasma Phys. Control. Fusion.
- [15] M. Greenwald, J. L. Terry, S. M. Wolfe, S. Ejima, M. G. Bell, S. M. Kaye and G. H. Neilson: Nucl. Fusion **28** (1988) 2199.
- [16] S. Ishida et al.: Plasma Phys. Contr. Nucl. Fus. Res. vol **1** (1993) 219.
- [17] Y. Koide et al.: Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 3662.
- [18] P. N. Yushmanov, T. Takizuka, K. S. Riedel, O. J. W. F. Kardaun, J. G. Cordey, S. M. Kaye and D. E. Post: Nucl. Fusion **30** (1990) 1999.
- [19] H. Shirai, T. Takizuka, O. Naito, M. Sato, N. Isei, Y. Koide, T. Hirayama and M. Azumi: J. Phys. Soc. Japan **64** (1995) 4209.
- [20] H. Shirai, T. Takizuka et al.: Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Phys. Contr. Nucl. Fus. Res. 1994, Seville (Vienna: IAEA) vol **1** (1995) 355.
- [21] ITER H-mode Database Working Group: Nucl. Fusion **34** (1994) 131.
- [22] ITER Confinement Database Modelling Expert Group, T. Takizuka: Proc. 16th Int. Conf. on Fusion Energy 1996, Montreal (Vienna: IAEA) vol **2** (1997) 795.
- [23] T. Takizuka: Plasma Phys. Control. Fusion **40** (1998) 851.
- [24] ITER Physics Expert Groups on Confinement and Transport and Confinement Modelling and Database, ITER Physics Basis Editors: Nucl. Fusion **39** (1999) 2175.
- [25] K. Tani, M. Azumi, H. Kishimoto and S. Tamura: J. Phys. Soc. Japan **50** (1981) 1726.
- [26] Y. Kamada et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **36** (1996) A123.
- [27] A. Colton et al.: Proc. 20th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys., Lisbon (Geneva: EPS) vol **17C** (1993) I-11.
- [28] J. G. Cordey et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **36** (1994) A267.
- [29] S. V. Neudatchin: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 3595.

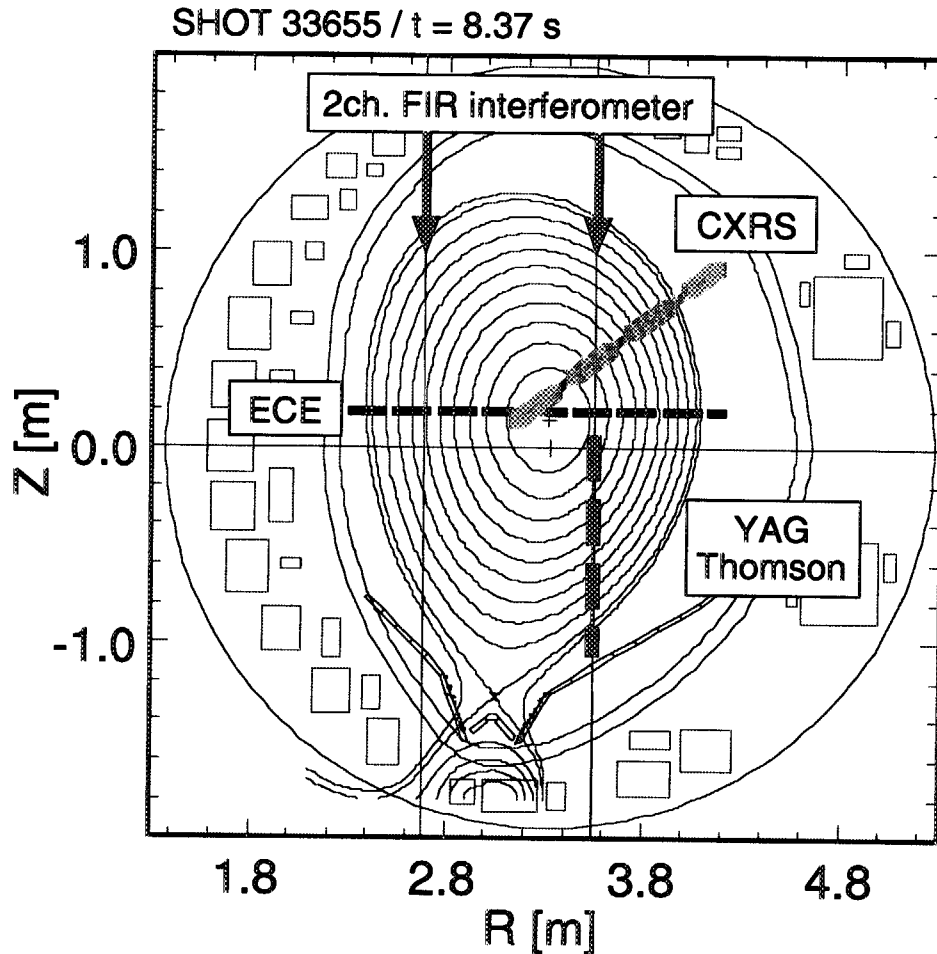
- [30] M. Greenwald, R. L. Boivin and F. Bombard et al.: Nucl. Fusion **37** (1997) 793.
- [31] W. Suttrop et al.: Plasma. Phys. Control. Fusion **39** (1997) 2051.
- [32] G. Janeshitz, Yu. Igitkhanov and M. Sugihara et al.: Proc. 26th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys., Maastricht (Geneva: EPS) vol **23J** (1999) 1445.
- [33] Y. Kamada et al.: Proc. 16th IAEA Fusion. Energy Conf., Montreal (Vienna: IAEA) vol **1** (1997) 247.
- [34] Y. Koide et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **38** (1996) 1011.

**Table 1.** Parameters of high  $\beta_p$  H-mode discharges with high triangularity.

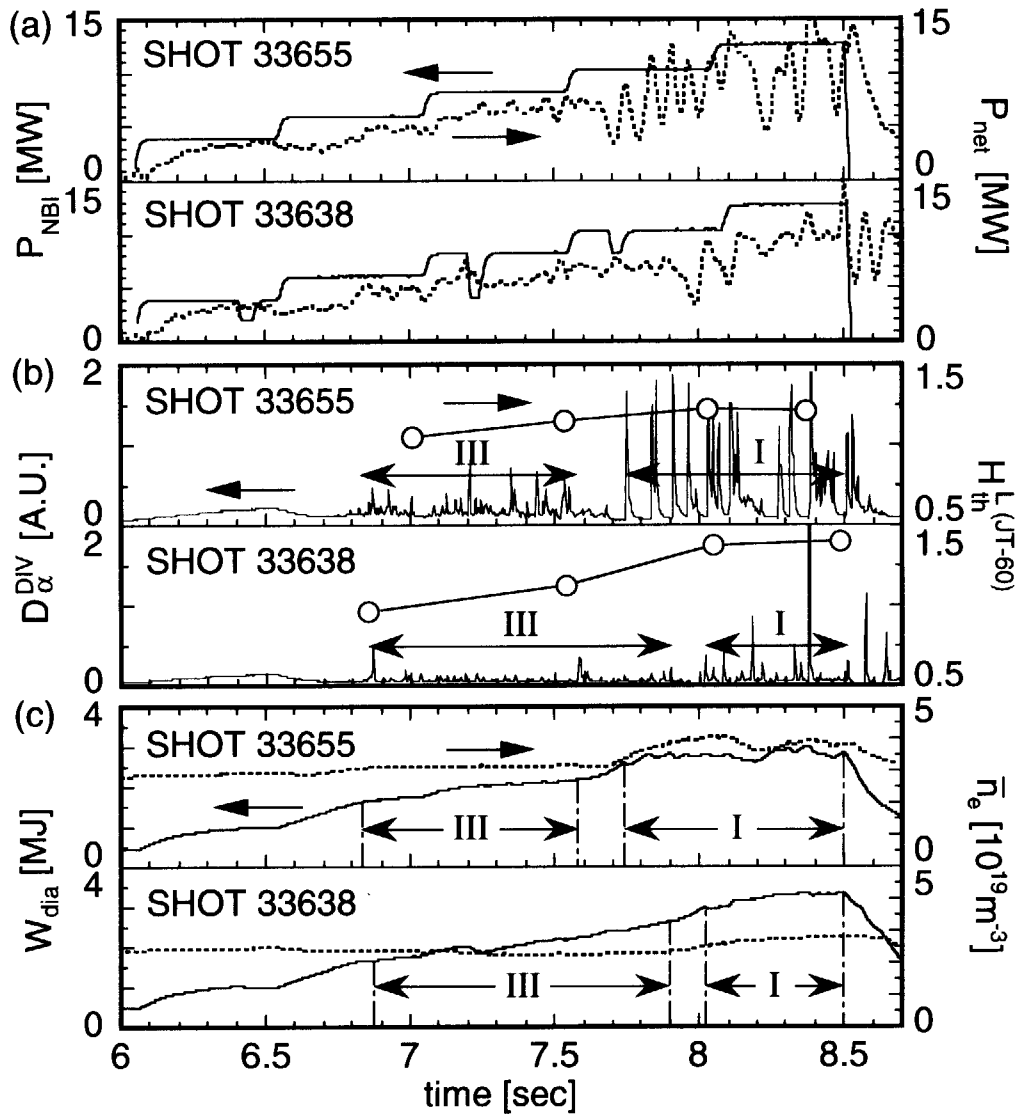
Shot	$I_p$ [MA]	$B_t$ [T]	$\bar{n}_e$ [ $\times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ]	$\kappa$	$\delta$	q95
32226	1.0	2.1	2.1	1.3	0.43-0.45	3.5
32358	1.0	2.1	3.0-4.0	1.4	0.45	3.5
32511	1.0	3.6	2.1-3.1	1.4	0.48-0.51	5.8-6.1
32519	1.0	3.6	1.7-1.9	1.3	0.44-0.47	5.6-5.9
32520	1.0	3.0	1.7-2.4	1.3	0.45-0.49	4.8-5.2



**Figure 1.** H-factors in type-I ELM phase based on ITER89P L-mode scaling, H (ITER89P-L), (open circles) and JT-60 L-mode and OH scaling, H (Thermal Plasma in JT-60), (closed circles) as a function of  $\bar{n}_e/n^{GW}$ . For type-III ELM phase, H (Thermal Plasma in JT-60) is plotted as shaded circles.

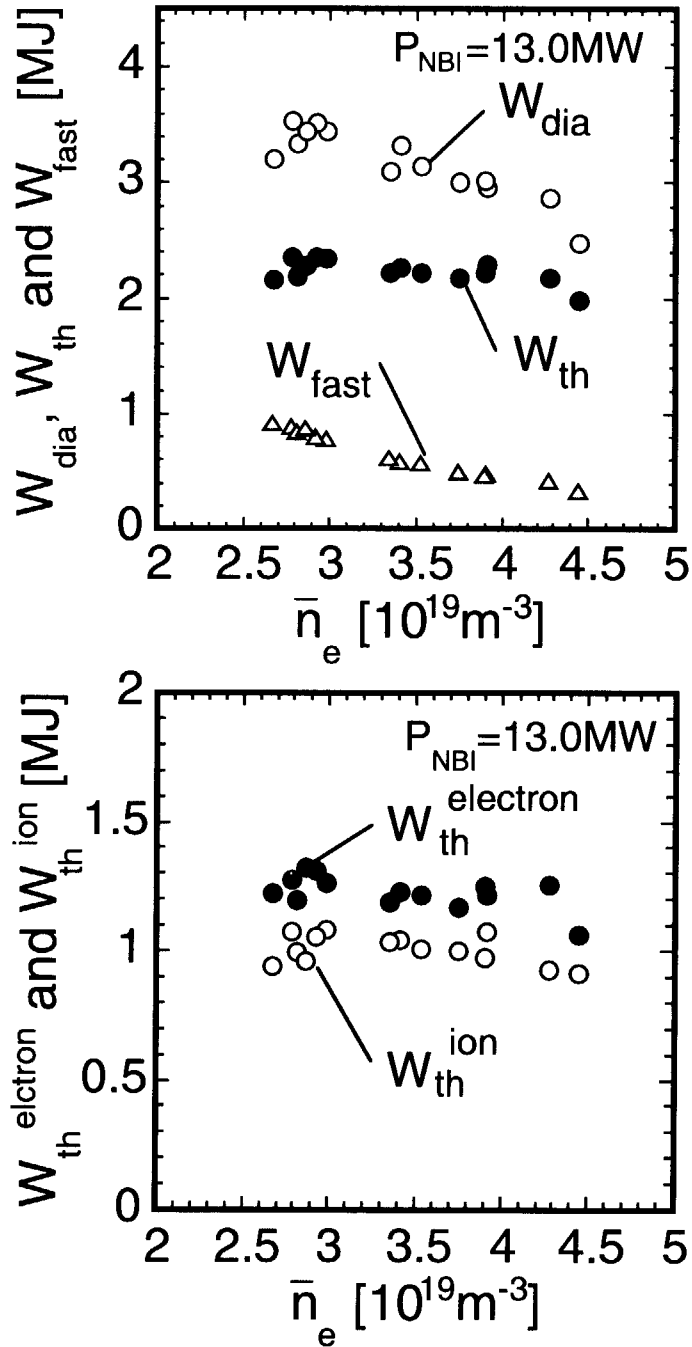


**Figure 2.** Sightlines and location of main diagnostics are illustrated on a cross section of the plasma equilibrium. The radial profiles of the electron density,  $n_e$ , and the electron temperature,  $T_e$ , were obtained by the Thomson scattering measurement of YAG laser. The core regions of  $T_e$  profiles were measured with the electron cyclotron emission (ECE) data. Ion temperature profiles,  $T_i$ , were measured with charge-exchange recombination spectroscopy (CXRS).

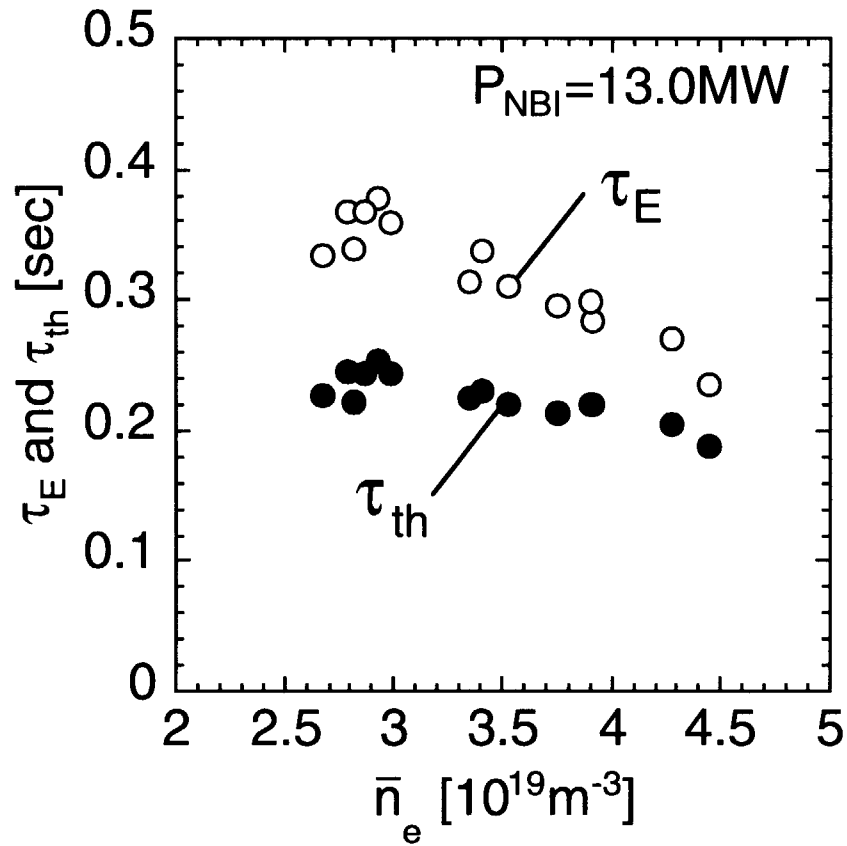


**Figure 3.** Time evolutions of plasma parameters in the high and low-density ELMy H-mode discharges (shot 33655 and 33638). (a) Neutral beam injection power,  $P_{\text{NBI}}$ , and the net heating power,  $P_{\text{net}}$ ; (b)  $D_{\alpha}$  emission signals and the H-factor based on JT-60 L-mode and OH scaling; (c) the global stored energy,  $W_{\text{dia}}$ , and line-averaged electron density,  $\bar{n}_e$ .

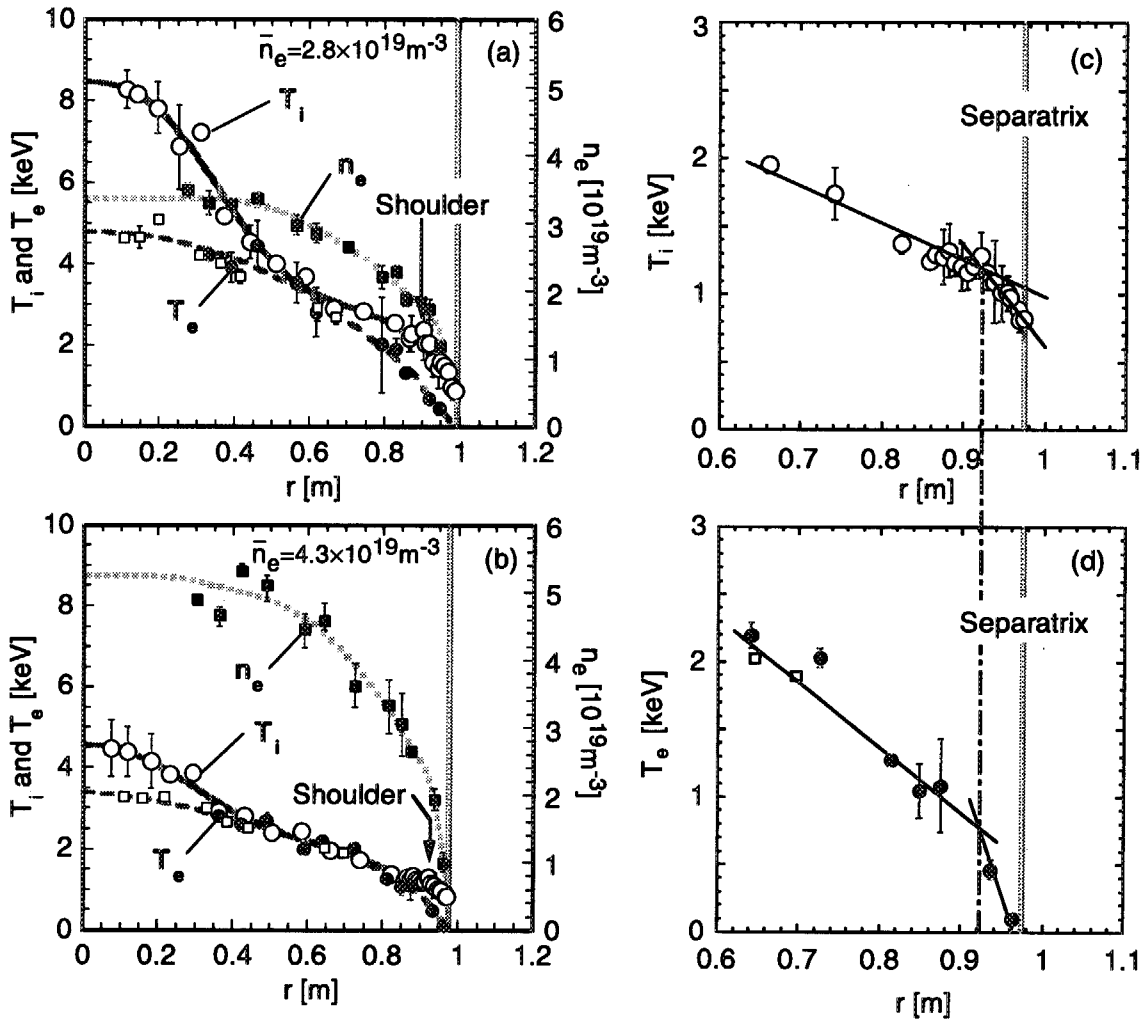




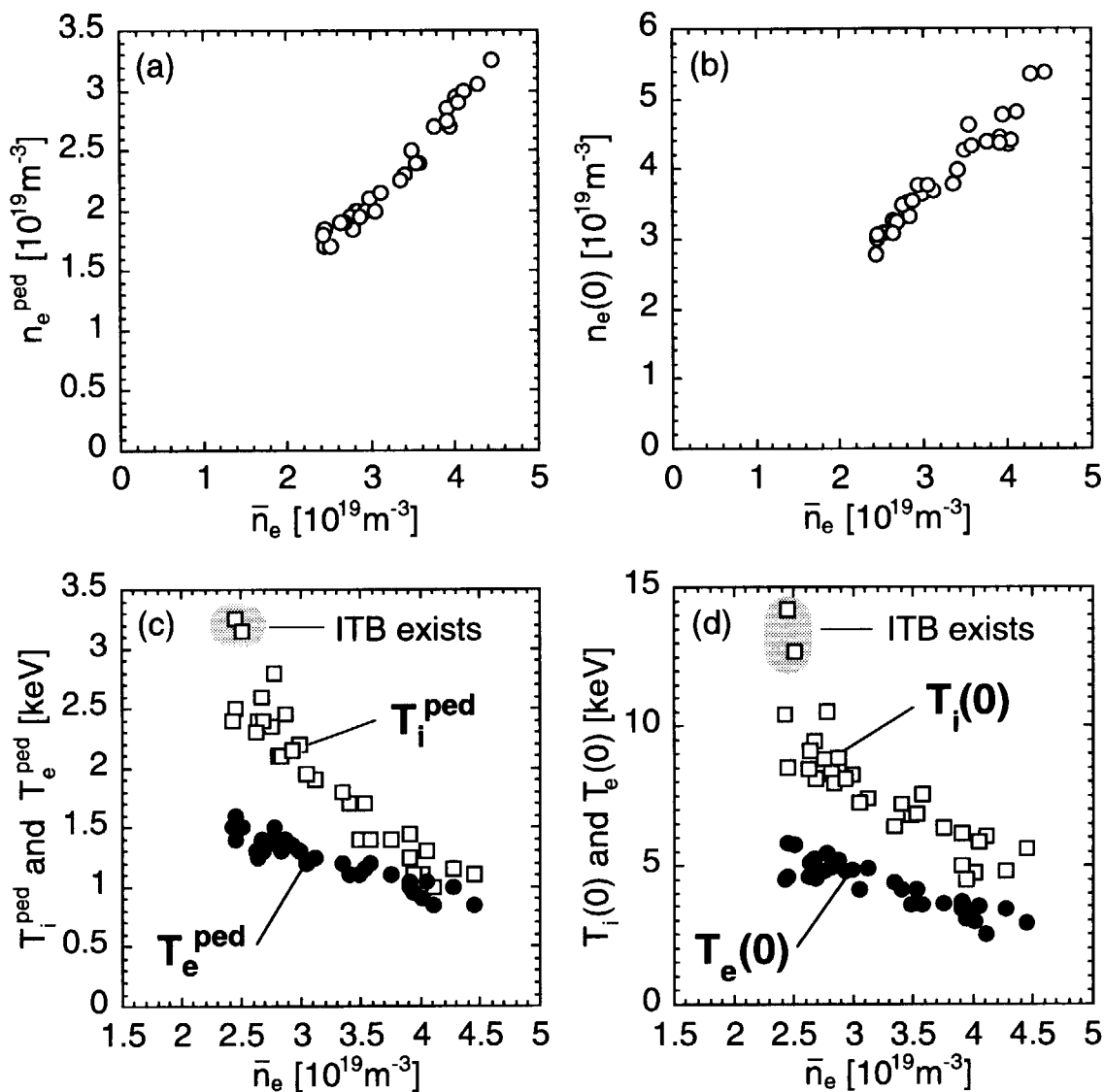
**Figure 4.** (a) The global stored energy,  $W_{\text{dia}}$ , (open circles) decreases with  $\bar{n}_e$ . The thermal stored energy,  $W_{\text{th}}$ , (closed circles) is kept constant although the energy stored in fast ions,  $W_{\text{fast}}$ , (open triangles) decreases with  $\bar{n}_e$ . (b) Both the electron stored energy,  $W_{\text{th}}^{\text{electron}}$ , (closed circles) and the ion stored energy,  $W_{\text{th}}^{\text{ion}}$ , (open circles) are kept constant over the wide range of  $\bar{n}_e$ .



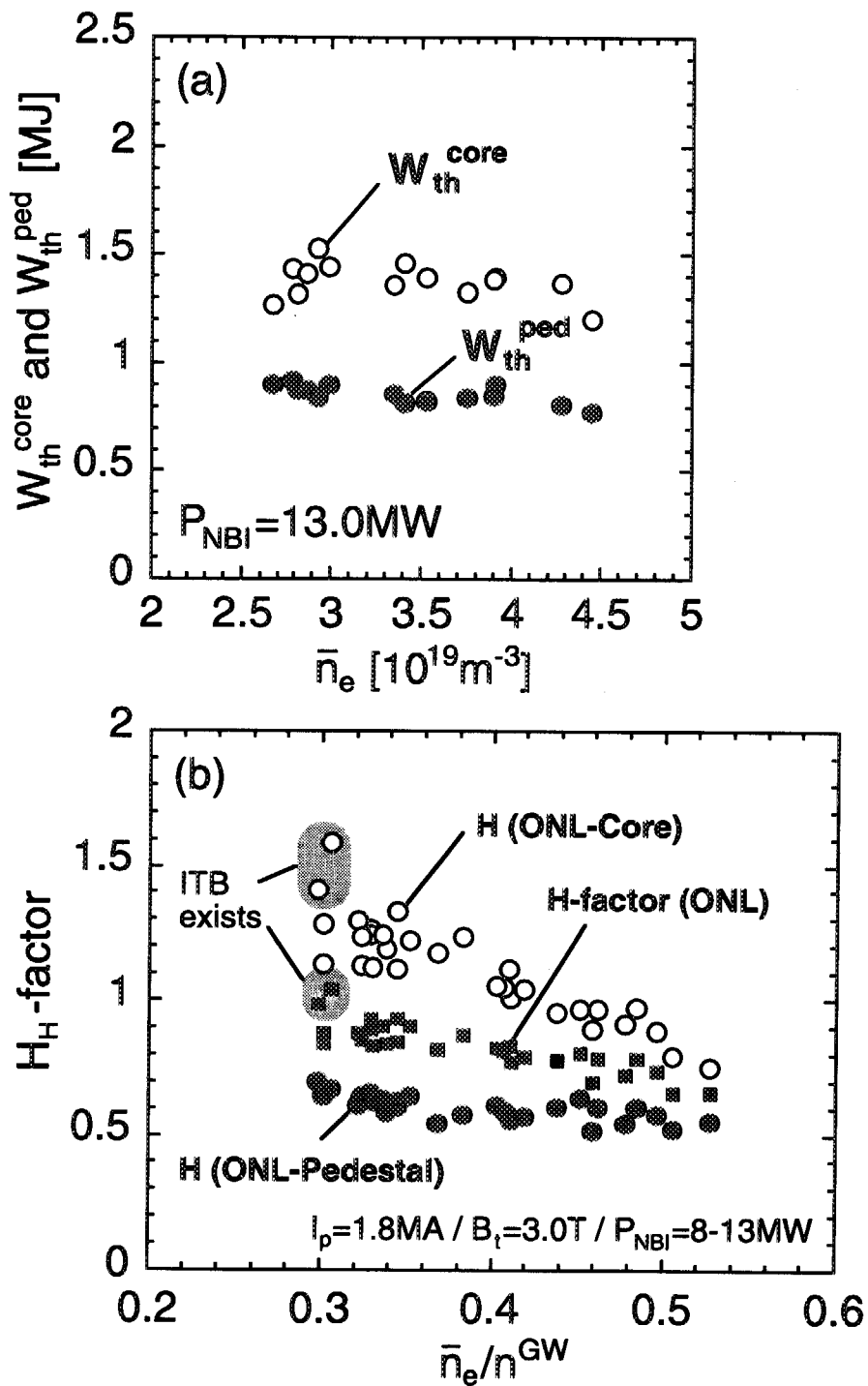
**Figure 5.** The global energy confinement time,  $\tau_E$ , (open circles) continuously decreases with  $\bar{n}_e$ . The thermal energy confinement time,  $\tau_{th}$ , (closed circles) gradually decreases in the high-density region.



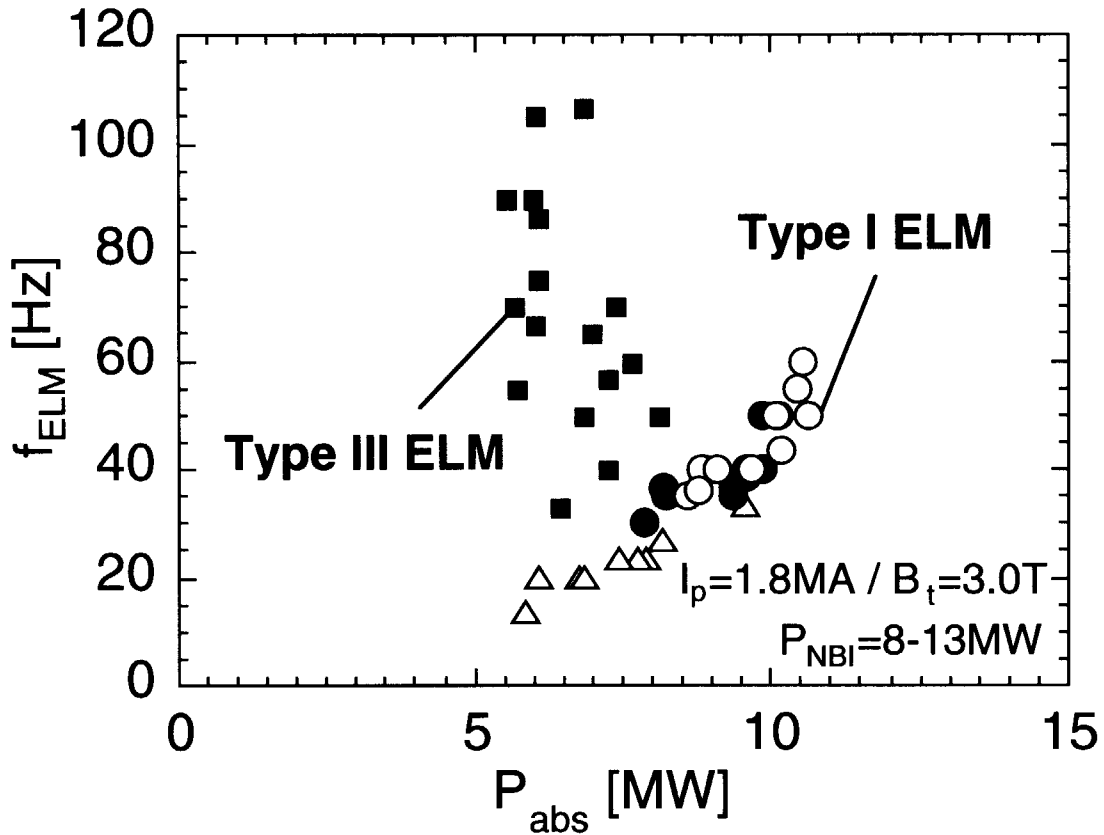
**Figure 6.** Radial profiles of  $T_e$ ,  $T_i$  and  $n_e$  in ELMy H-mode plasmas (a) at a low-density ( $=2.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ), and (b) at a high-density ( $=4.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ). The separatrix position is shown by a dark column. The extensions of the edge region are illustrated for (c)  $T_i$  and (d)  $T_e$  in the high-density plasma.



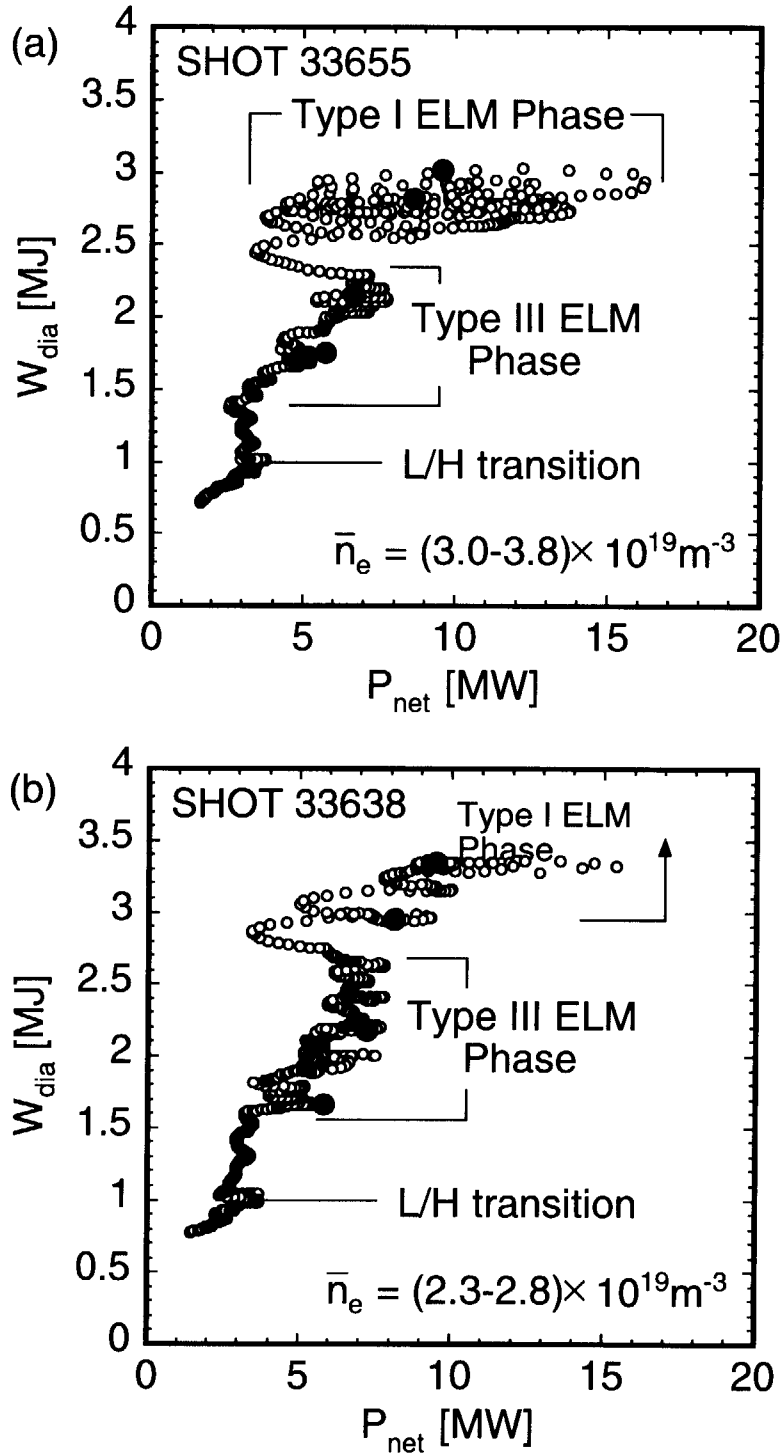
**Figure 7.** Density dependences of (a)  $n_e^{\text{ped}}$  and (b)  $n_e(0)$  in ELMy H-mode plasmas and the comparison of  $T_i$  and  $T_e$  (c) at the shoulder of the H-mode pedestal and (d) at the center as a function of  $\bar{n}_e$ . Open squares and closed circles indicate  $T_i$  and  $T_e$  in type-I ELM phase, respectively.



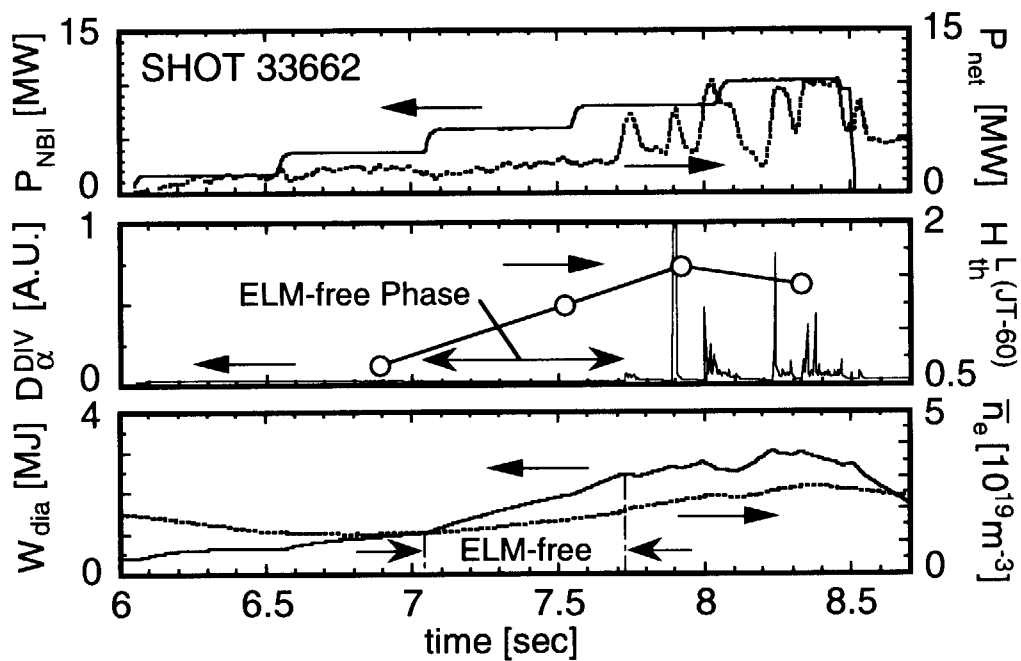
**Figure 8.** (a) Density dependences of  $W_{th}^{core}$  (open circles) and  $W_{th}^{ped}$  (closed circles) with  $P_{NBI} = 13.0 \text{ MW}$ . (b) H-factor in type-I ELMy phase based on the offset non-linear scaling,  $H$  (ONL), is plotted as closed squares. Open and closed circles indicate the enhancement factors of the core and pedestal confinement ( $H$  (ONL-Core) and  $H$  (ONL-Pedestal)) derived with the ONL scaling, respectively.



**Figure 9.** Dependences of ELM frequency,  $f_{\text{ELM}}$ , on  $P_{\text{abs}}$  in ELMy H-mode discharges. The data groups with  $f_{\text{ELM}}$  increasing linearly with  $P_{\text{abs}}$  correspond to type-I ELMs. Open triangles, closed and open circles indicate the density regions of  $\bar{n}_e = (2.4-2.7) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $\bar{n}_e = (2.8-3.5) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  and  $\bar{n}_e = (3.6-4.5) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , respectively. The other group with high  $f_{\text{ELM}}$  at low power corresponds to type-III ELMs (closed squares).



**Figure 10.** Power scan of the global stored energy (a) at a high-density:  $\bar{n}_e=(3.0-3.8) \times 10^{19} m^{-3}$  and (b) at a low-density:  $\bar{n}_e=(2.3-2.8) \times 10^{19} m^{-3}$ . The analytic results calculated by the OFMC and TOPICS are also shown as closed circles.



**Figure 11.** Time evolution of plasma parameters in the low-density (no type-III phase) ELMy H-mode discharge.



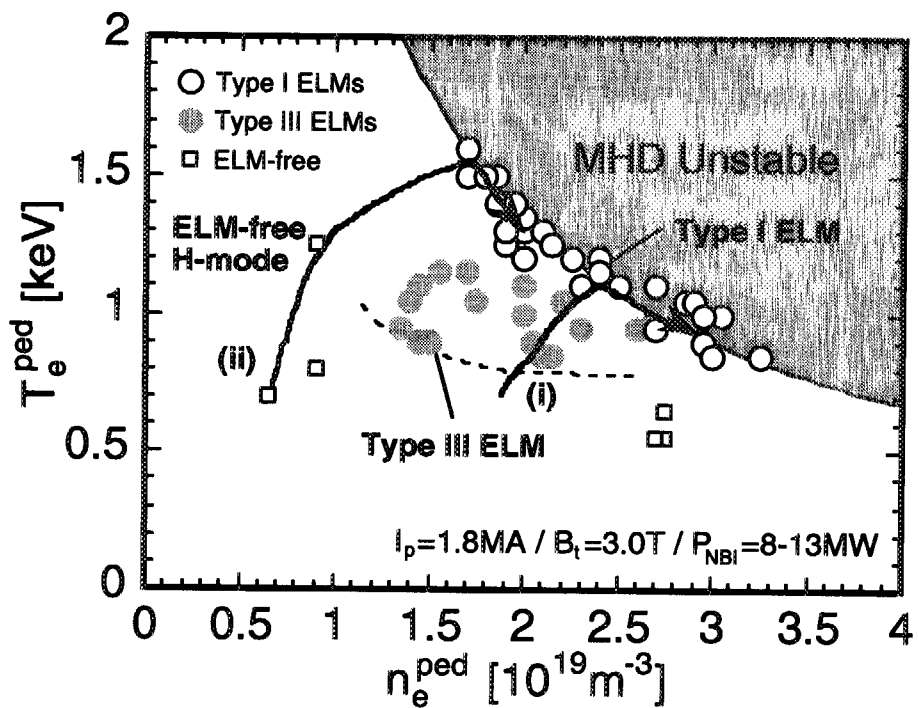
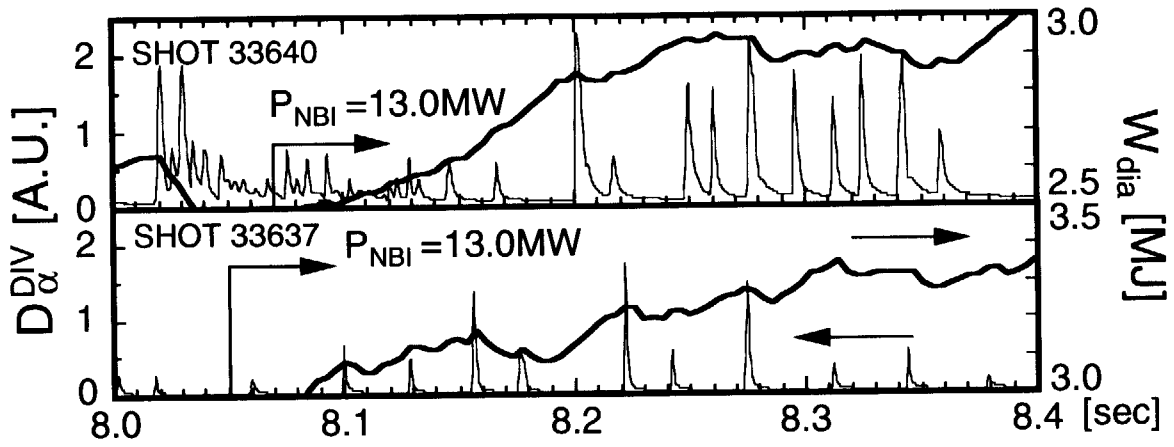
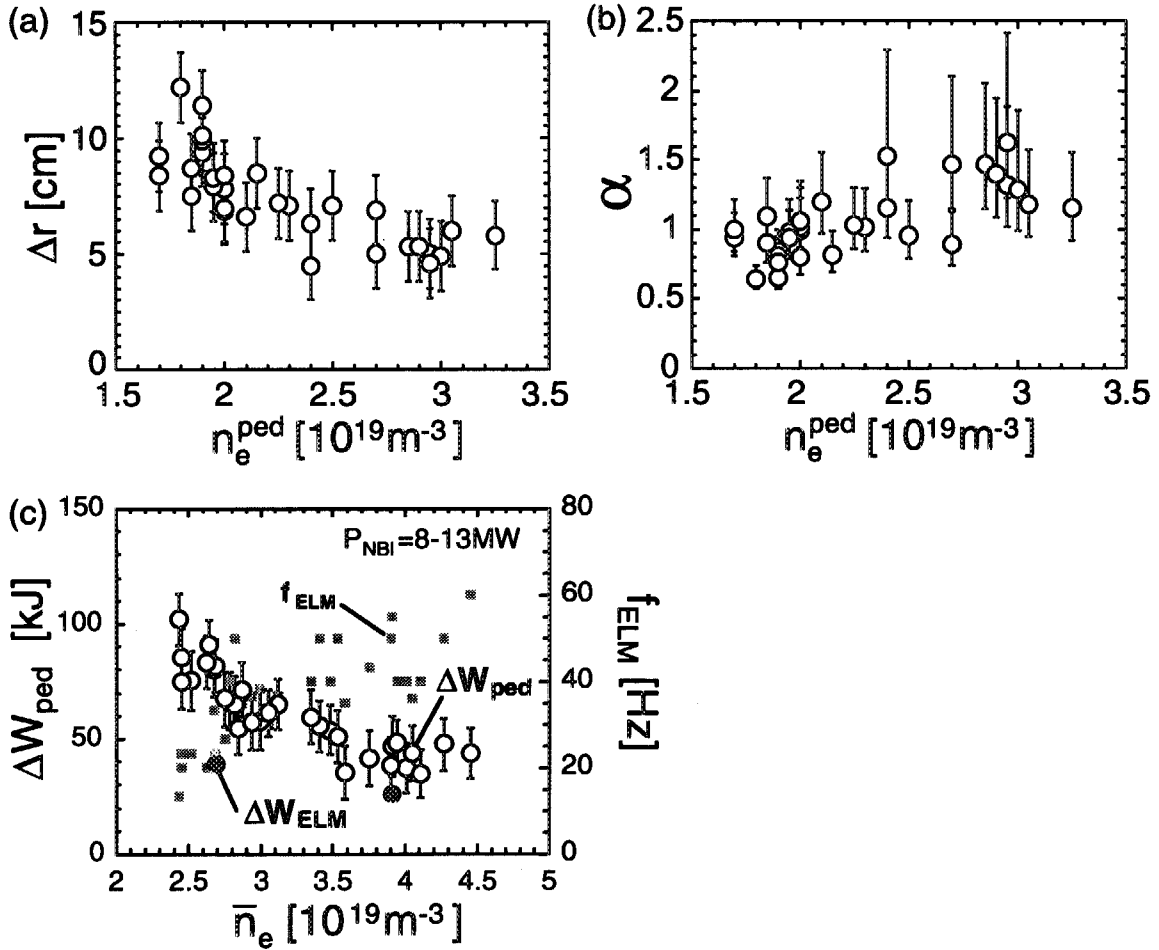


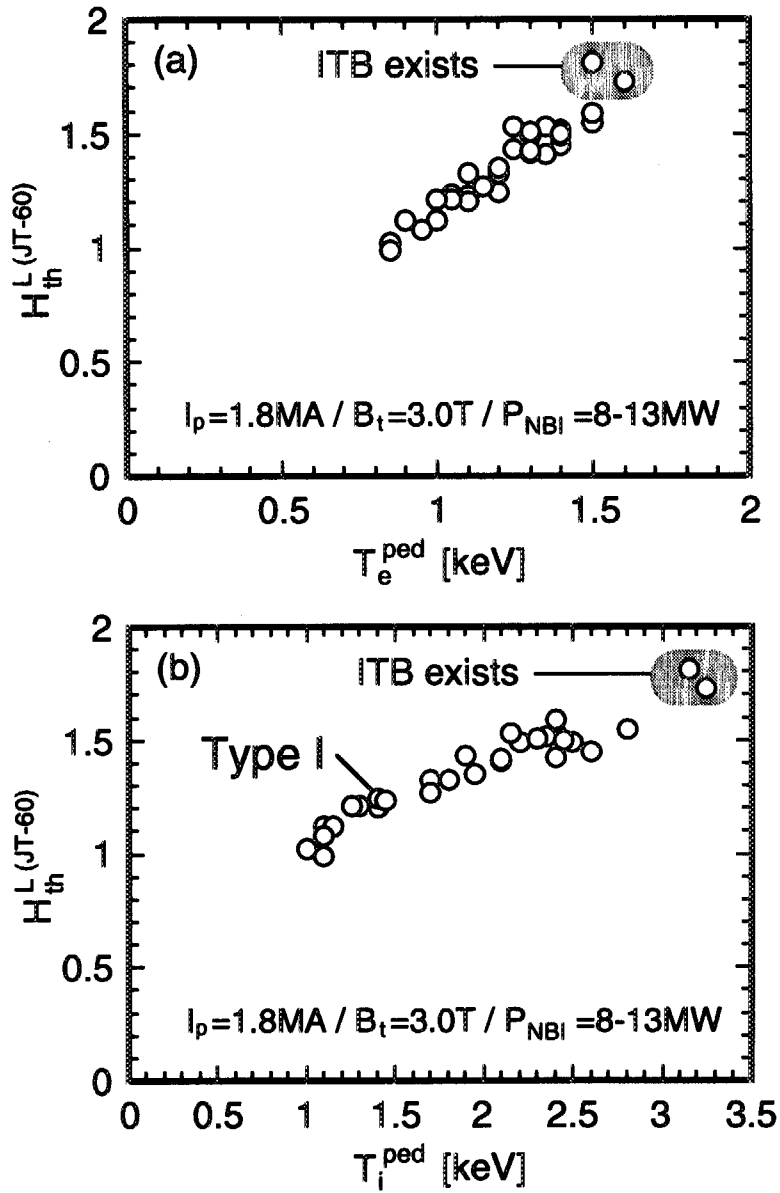
Figure 12. Diagram of  $(n_e^{\text{ped}}, T_e^{\text{ped}})$  space for classifying ELM behavior in JT-60U.



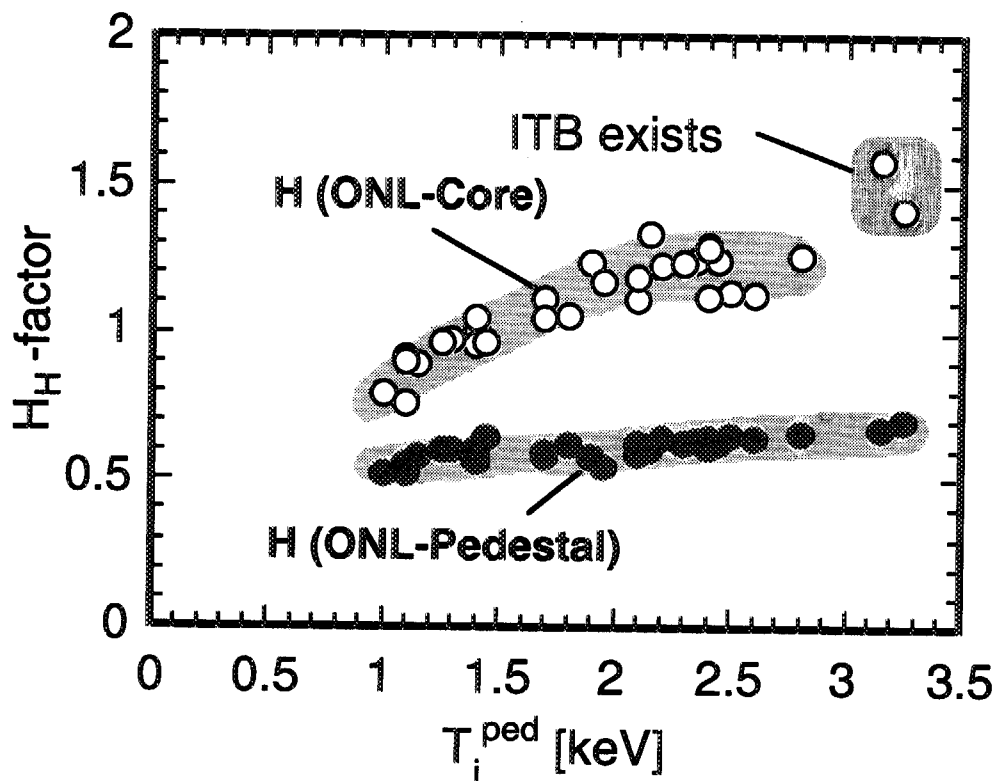
**Figure 13.** Change in the global stored energy,  $W_{dia}$ , due to type-I ELM behavior in the high and low-density plasmas.



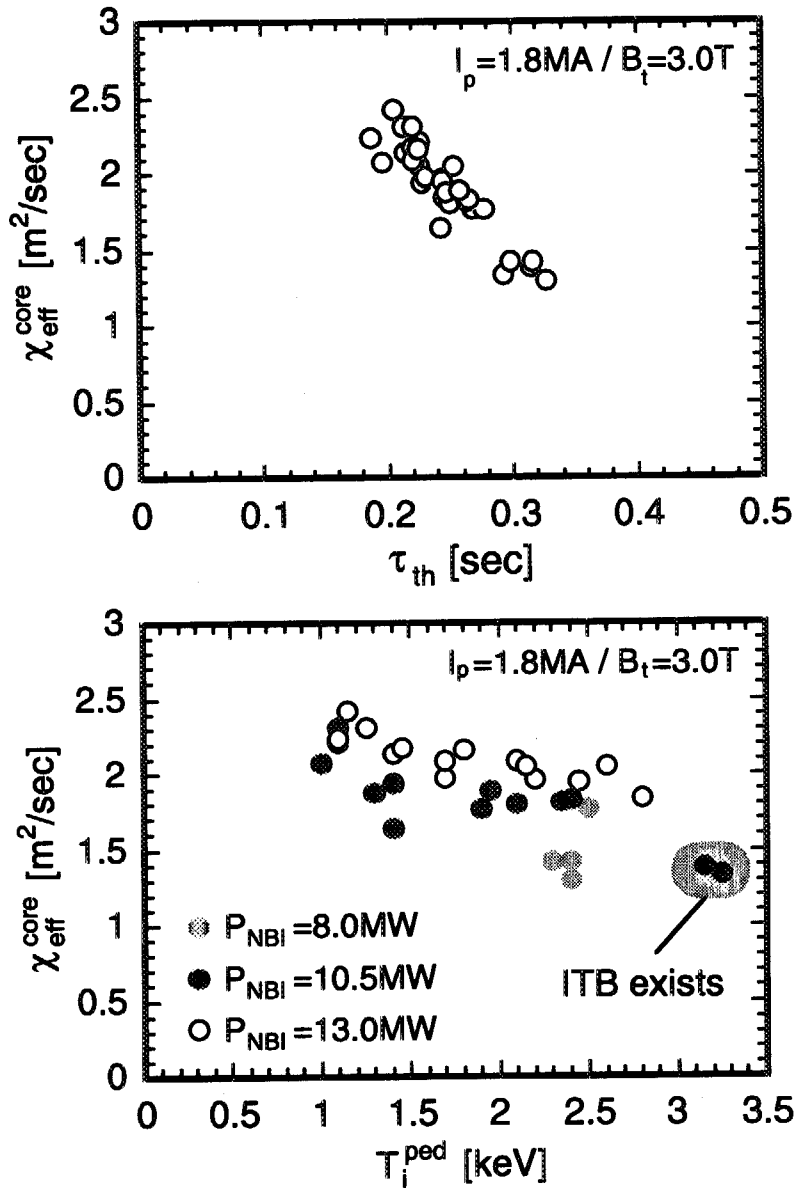
**Figure 14.** (a) The pedestal width,  $\Delta r$ , decreases with  $n_e^{\text{ped}}$  during type-I ELM phase. (b) The  $\alpha$ -parameter tends to increase gradually with  $n_e^{\text{ped}}$ . (c) The energy stored outside the shoulder of the H-mode pedestal,  $\Delta W_{\text{ped}}$  (open circles) decreases and the ELM frequency,  $f_{\text{ELM}}$ , (shaded squares) increases with  $\bar{n}_e$ . The energy loss expelled by each burst,  $\Delta W_{\text{ELM}}$  is plotted as closed circles.



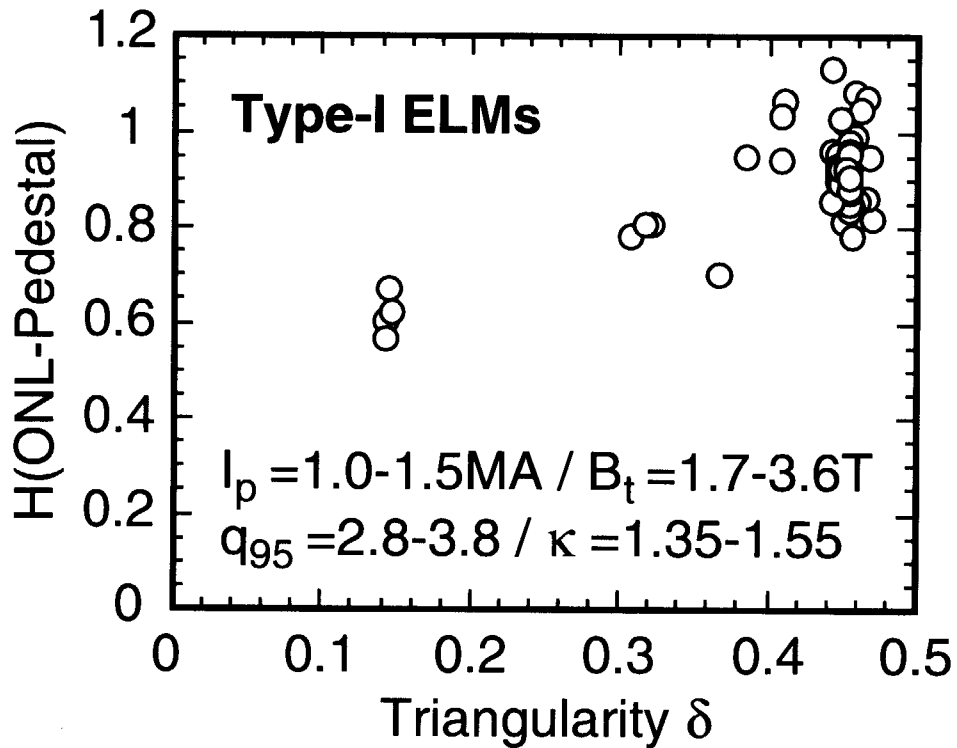
**Figure 15.** Influence of the pedestal temperature ( $T_e^{\text{ped}}$  and  $T_i^{\text{ped}}$ ) upon the thermal energy confinement,  $H_{\text{th}}^{\text{L}}(\text{JT-60})$ , during type-I ELM regime.



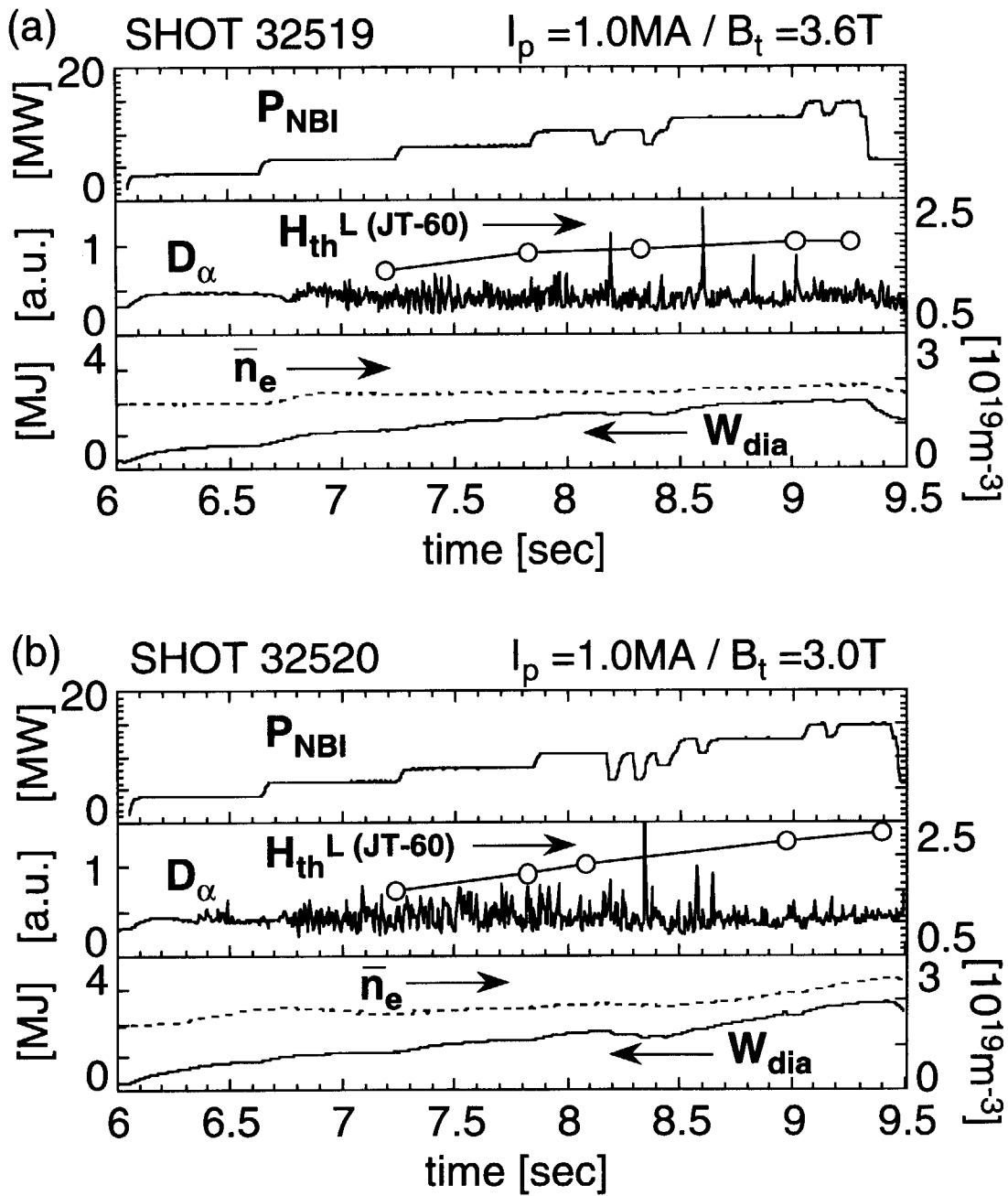
**Figure 16.** The enhancement factor of the core plasma based on the ONL scaling,  $H$  (ONL-Core), depends strongly upon the temperature at the shoulder of the H-mode pedestal, while the pedestal component,  $H$  (ONL-Pedestal) is not strongly changed.



**Figure 17.** (a) The effective thermal conductivity of the core plasma,  $\chi_{\text{eff}}^{\text{core}}$ , decreases inversely with  $\tau_{\text{th}}$ . (b) Decrease in the pedestal temperature brings about the confinement degradation of the core plasma.

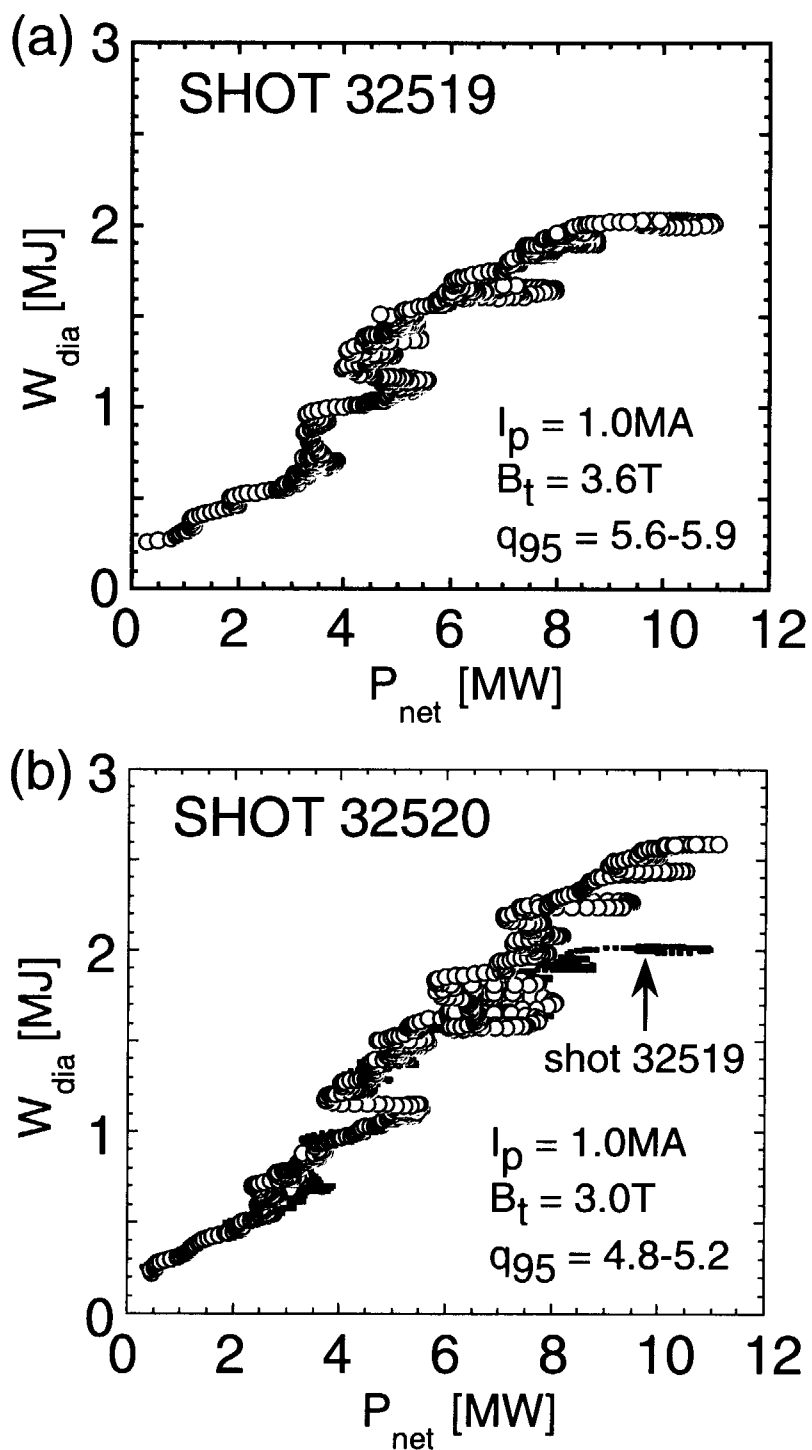


**Figure 18.** High triangularity discharges can raise  $W_{th}^{ped}$ , imposed by the destabilization of type-I ELMs, and the improvement of the core energy confinement is expected by a high pedestal temperature produced even at a high-density.

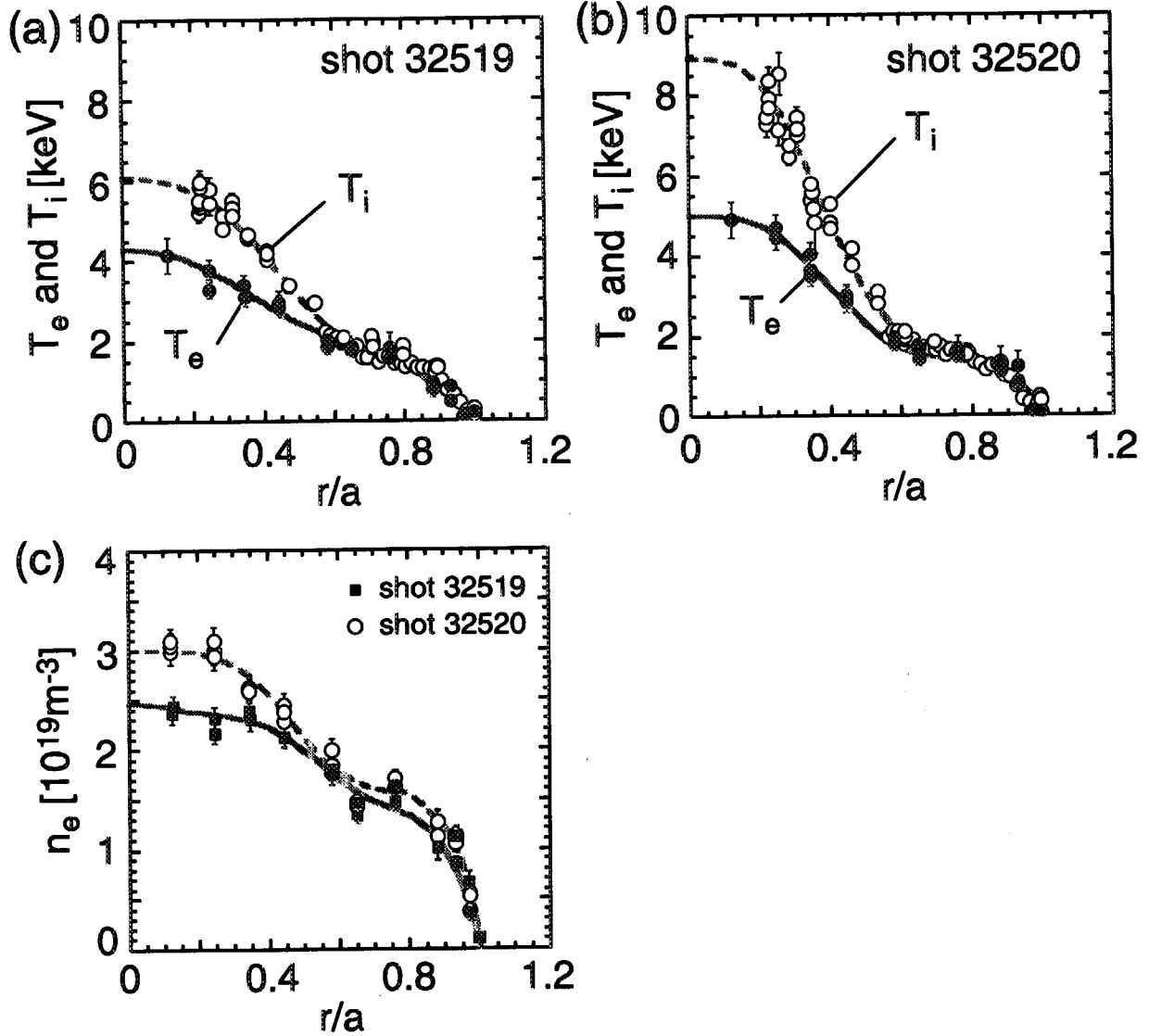


**Figure 19.** Time evolutions of plasma parameters in high  $\beta_p$  H-mode discharges (shot 32519 and shot 32520).

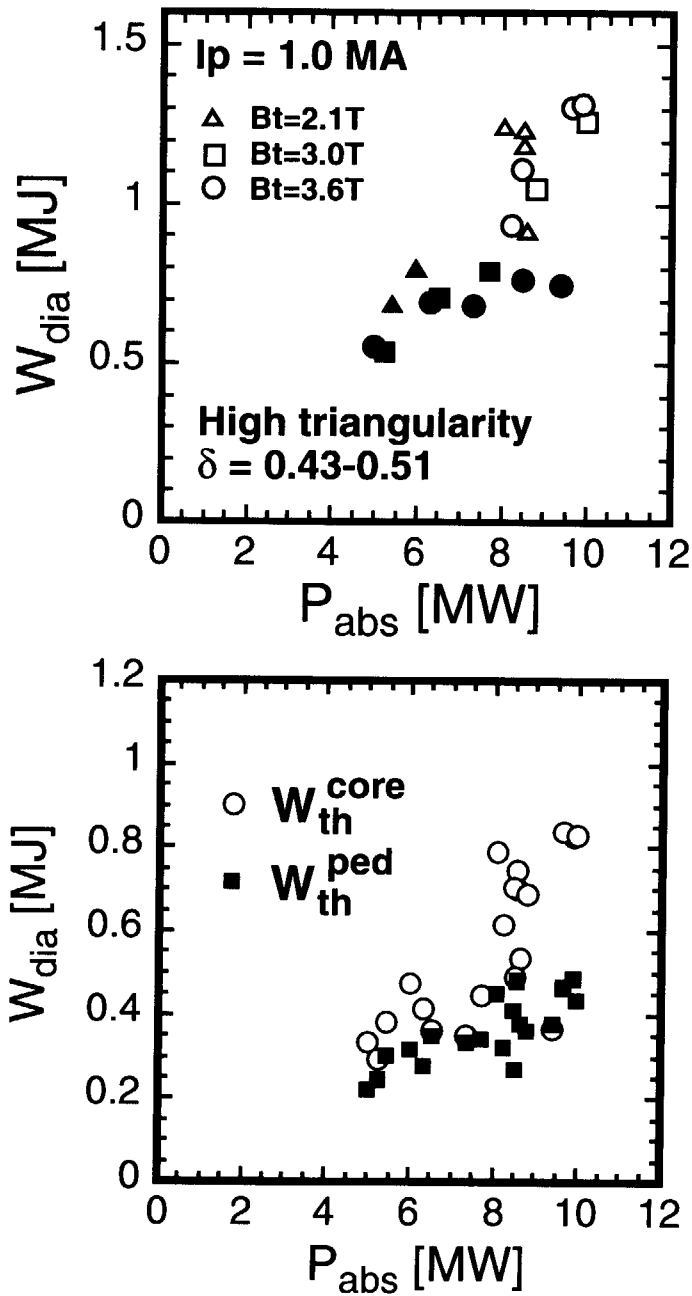




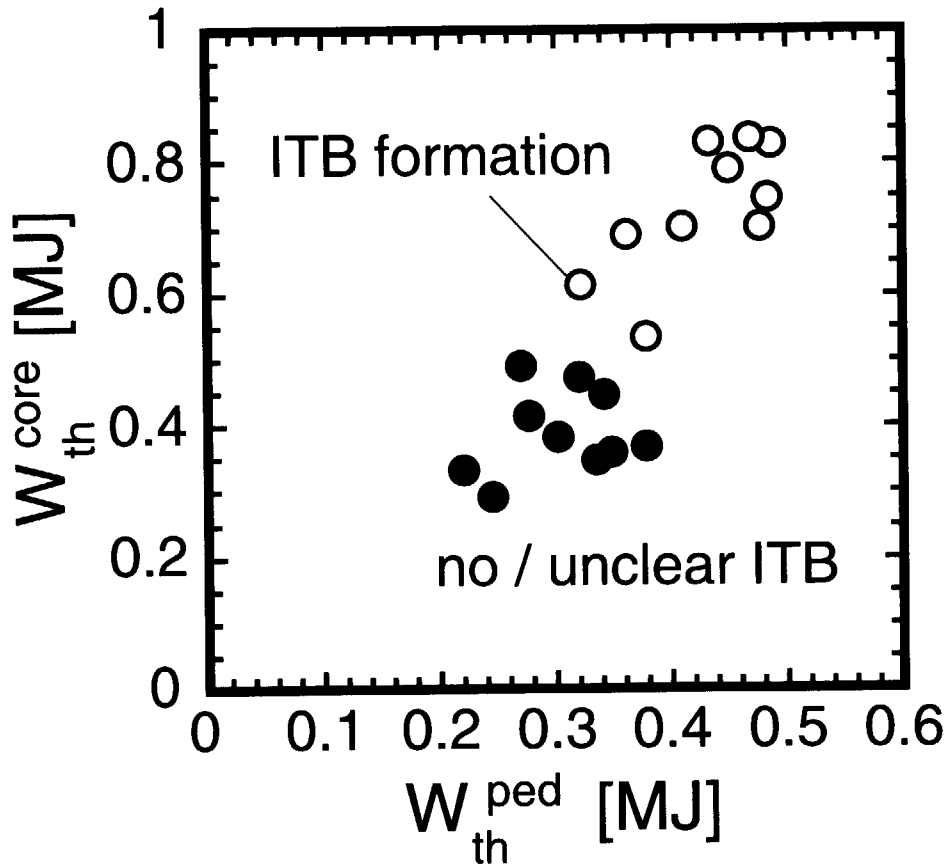
**Figure 20.** Power scan of the global stored energy (a) with an unclear ITB (shot 32519) and (b) with a clear ITB (shot 32520).



**Figure 21.** Profiles of  $T_e$  and  $T_i$  in high  $\beta_p$  H-mode discharges (a) with an unclear ITB (shot 32519) and (b) with a clear ITB (shot 32520). (c) Profiles of  $n_e$  in these two discharges.



**Figure 22.** (a) Power dependence of the thermal stored energy,  $W_{th}$ , in high  $\beta_p$  H-mode plasmas. Open and closed symbols indicate the plasmas with and without ITB, respectively. (b) Power dependence of the core and pedestal stored energy ( $W_{th}^{core}$  and  $W_{th}^{ped}$ ) in the plasmas shown above.



**Figure 23.** Correlation between the pedestal and core stored energy ( $W_{th}^{core}$  and  $W_{th}^{ped}$ ) in high  $\beta_p$  H-mode plasmas. Open and closed circles indicate the plasmas with and without ITB, respectively.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J

1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m

1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>

1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa

1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>

1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq

1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg

1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy

1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れていない。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

JT-60Uにおける高密度ELMYモードプラズマの閉じ込め劣化