

JAERI-M  
88-171

トカマク型炉心プラズマの定常運転領域  
— 整合性解析 (I) —

1988年9月

伊藤 公孝\*・福山 淳\*\*・伊藤 早苗\*\*\*  
滝塚 知典・山本 新・松田慎三郎

JAERI-M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。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）にて、  
お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-  
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日青工業株式会社

トカマク型炉心プラズマの定常運転領域  
— 整合性解析 (I) —

日本原子力研究所那珂研究所核融合実験炉特別チーム

伊藤 公孝\*・福山 淳\*\*・伊藤 早苗\*\*\*

滝塚 知典・山本 新・松田慎三郎

(1988年8月12日受理)

トカマク型核融合炉の炉心プラズマについて、物理設計の観点から要請される条件を求めた。IETR級のプラズマについて、定常運転が可能であるための種々の条件、たとえば密度限界、限界ベータ値、完全電流駆動やダイバータ機能の確保などを挙げ、それ等が同時に満たされるパラメータ領域を求めた。現存のデータベースに基づいて、各条件の整合性に重きを置いて吟味を行った。閉じ込め時間の比例則としてはLモード則を用い、サイズの依存性や、Q値について評価を行なった。整合性ある定常運転領域の存在が示された。オフセットリニア型の比例則が成立するなら、プラズマ電流  $I_p = 20 \text{ MA}$  の運転領域に入るための必要最小入力パワーは、およそ  $130 \text{ MW}$  である。また入力パワーを  $200 \text{ MW}$  迄増せば、 $Q \simeq 5$  の条件も満たされ得る事が判明した。

---

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

\* 京都大学ヘリオトロン核融合研究センター

\*\* 岡山大学工学部電気電子工学科

\*\*\* 広島大学核融合理論研究センター

Steady-State Operation Regime of Tokamak Reactor Plasma  
- Consistency Analysis (I) -

Kimitaka ITOH<sup>\*</sup>, Atsushi FUKUYAMA<sup>\*\*</sup>, Sanae-Inoue ITOH<sup>\*\*\*</sup>  
Tomonori TAKIZUKA, Shin YAMAMOTO, and Shinzaburo MATSUDA

Fusion Experimental Reactor Team  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 12, 1988)

Consistency of physics constraints imposed on a core plasma in a tokamak reactor is investigated. Conditions for the stationary operation of the ITER-grade plasma are listed, i.e., density limit, critical- $\beta$ , feasibilities of full current-drive and divertor functioning, and so on. The parameter regime, in which these guide lines are simultaneously satisfied, is searched for. Based on the present data base, we examine the consistency of conditions. The L-mode scaling is employed for the extrapolation. The Q-value and the size dependence are studied. The consistent working region of the stationary operation is found. If the offset-linear scaling is applied, the minimum and necessary input power is around 130 MW, which enables the full current-drive and stationary operation with  $I_p = 20$  MA. When the input power is increased up to 200 MW, the Q-value of 5 can be possible.

Keywords: Tokamak, Reactor, ITER, Steady-state Operation,  
Current-drive, Divertor Function, Q-value

---

\* Plasma Physics Laboratory, Kyoto University  
\*\* School of Engineering, Okayama University  
\*\*\* Institute for Fusion Theory, Hiroshima University

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 炉心プラズマ条件の設定 .....	3
2.1 条件のまとめ .....	3
2.2 $\beta$ 値の限界 .....	4
2.3 プラズマ電流の限界 .....	4
2.4 密度限界 .....	5
2.5 エネルギー閉じ込め時間 $\tau_E$ .....	5
2.6 粒子閉じ込め時間 $\tau_p$ .....	6
2.7 $\alpha$ 粒子閉じ込め .....	7
2.8 電流駆動効率 .....	7
2.9 粒子及び熱除去 .....	7
3. 運転領域 .....	10
3.1 標準装置パラメータ .....	10
3.2 核融合出力 .....	11
3.3 定常運転領域 .....	13
3.4 装置サイズ依存性 .....	14
3.5 ブートストラップ電流の効果 .....	15
3.6 中性子壁負荷 .....	16
4. まとめと討論 .....	17
参考文献 .....	19

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Conditions for the core plasma .....	3
2.1 Summary of conditions .....	3
2.2 $\beta$ -limit .....	4
2.3 Plasma current limit .....	4
2.4 Density limit .....	5
2.5 Energy confinement time $\tau_E$ .....	5
2.6 Particle confinement time $\tau_p$ .....	6
2.7 Confinement of $\alpha$ -particles .....	7
2.8 Current-drive efficiency .....	7
2.9 Particle and heat exhaust .....	7
3. Operation regime .....	10
3.1 Standard parameter .....	10
3.2 Fusion output .....	11
3.3 Stationary operation regime .....	13
3.4 Dependence on machine size .....	14
3.5 Effect of Bootstrap current .....	15
3.6 Neutron wall loading .....	15
4. Summary and discussion .....	17
References .....	19

## 1. 序 論

三大トカマクの実験におけるデータ・ベースも整いつつある現在、FER、NET、ITERをはじめとした実験炉の設計の気運が盛り上がって来ている。特に、今年度よりITERプロジェクトは必要なトピックスを選び専門家会議を開催している。トピックスとしては、

- 1) Operational limit and Plasma Performance
  - ・ Energy Confinement
  - ・ Fast-ion Confinement
  - ・ Density Limit
  - ・ MHD Limit
  - ・ Plasma Performance
- 2) Poloidal Field Design
- 3) Current Drive and Heating
- 4) Power and Particle Control
- 5) Disruption

が選ばれ、討議されて来ている。これらの議論ではあるものは深く掘り下げられ、あるものは広く情報が集められているが、提示され得る条件が比較的明確になっているものと、外挿性に曖昧さの残るものとが共存している。また全体として見た場合の条件の整合性や優位性などは、未だに系統的に解析されて来ていない。ITERなど、目標Q値と定常運転などというミッションを掲げた装置が、各条件を満たし得るのかという検討が必要である。例えば、定常運転のための電流駆動、灰除去や熱除去に対する要請について、電流駆動効率やダイバータ、排気機能から考えて、全条件を同時に満たす動作領域がどのようなものか未だ知見は明確にされていない。

そこで、上記の様な個々別々の条件の解析（ITER物理設計の活動）を受けて、1）それらが同時に満たされる炉心プラズマとはどのようなものであろうか、2）それは、果して現存の知識や技術から開発可能なものなのであろうか、という問題意識のもとに一貫した解析を行う試みを始めた。

個々のデータベースの集約を計るにしても、物理、炉工学的ミッションの違いにより、想定されるプラズマ・パラメータや装置サイズなどが大きく左右され、全体像がぼやけてしまうことになりかねない。そこで本報告では、解析の手始めとして”定常運転できる条件”を考え、その動作領域を探す事に主眼をおいた。また、その領域でのプラズマ・パラメータを見通すQ値としてのミッションはどの位満たせるかの評価も行った。その結果、2章で与えられる全条件を満たす定常運転が可能なパラメータ領域が、ITER級の装置で存在する事が確認された。

以下に本報告の構成を示す。2章では炉心に課せられる条件を、1）MHD限界（ $\beta$ 値、 $q$ 値、 $\bar{n}$ 限界）、2）閉じ込めスケーリング則（ $\tau_E$ 、 $\tau_D$ ）、3）

電流駆動効率 ( $I/P$ )、4) 熱、灰除去とダイバータ機能 ( $T_{div}$ ,  $\Gamma_{pump}$ ) の観点から提示する。(加熱に必要なパワーの条件などは、3) の条件より弱いので、3) の中に組み込まれているものとする。) 3章では、定常運転という目標を設定した場合に2章で与えられた条件を同時に満たす動作領域について解析し、プラズマのパフォーマンスやQ値を評価する。サイズを変化させた時に、動作領域やQ値がどの様になるかを見通す。4章では、全体のまとめとして、装置のミッションと動作領域を対応づけて論じ、定常運転とQ=5の両立性への展望を明らかにする。また解析から得られた結果をもとに改善できる方向は何かを探り、現在の段階で改善可能であると思われる事柄や、新しい概念が要求される事などについて論及する。また、ハード、ソフトの両面から今後重点を置くべきR&Dについても述べる。

本作業会は1988年7月6日-9日に渡り、ITER-プロジェクトの物理設計活動を受けて、原研那珂研において行なわれた。7日の終日の討論会や8日9日にわたる研究作業をもとに、本報告書を取りまとめた。作業会出席者は大学側より伊藤公孝、伊藤早苗、福山淳、原研側より松田慎三郎、滝塚知典、山本新、安積正史、木村晴行、森雅博であった。本事業は、原研-大学協力事業及び研究嘱託事業に基づき行なわれた。関係各氏に御礼を申し上げます。また、文部省科学研究費エネルギー特別研究の一部援助も受けて行なわれた。



## 2. 炉心プラズマ条件の設定

## 2.1 条件のまとめ

炉心としての基本条件と、外挿に使用される比例則を、現在得られている知見をもとにして列挙する。各々の条件の設定理由等の説明は § 2.2 以下に記すが、特に断わらない限り、主半径  $R$  小半径  $a$  は  $m$ 、プラズマ体積  $V_p$  は  $m^3$ 、磁場  $B$  は  $T$ 、電子密度  $n_e$  は  $10^{20}/m^3$ 、温度  $T$  は  $keV$ 、プラズマ電流  $I_p$  は  $MA$ 、総加熱パワー  $P$ 、入力パワー  $P_{in}$  と  $\alpha$  粒子の核反応パワー  $P_\alpha$  は  $MW$  を単位とした値を示す。  $T_e = T_i$  を仮定し、  $n$ 、  $T$  は体積平均値を用いるものとする。  $\kappa$  は非円形度、  $M$  はイオン質量数を示す。

(1) 限界  $\beta$  値

$$\beta < \beta_c (\%) = g \frac{I_p}{aB}, \quad g = 2.7$$

(2) 限界  $q$  値

$$q_{\psi 95\%} \geq 3$$

## (3) 限界密度値

$$\bar{n}_e < \bar{n}_c = 0.4 \frac{I_p}{a^2} (0.1P)^\alpha, \quad \alpha = 0.25 \quad (\bar{n}_e: \text{線平均密度})$$

## (4) 電流駆動効率

$$I_p < \frac{CT}{nR} P_{in}, \quad C = 0.026$$

## (5) 低温ダイバータプラズマ

$$T_{div} < 10eV, \quad T_{div} (eV) = \frac{2.5\sqrt{P}}{n^2 \kappa a R}$$

## (6) 灰排気 (初期的解析結果)

$$\frac{n_e V_p}{\tau_p} > 10^4 S_\alpha \quad (S_\alpha: \alpha \text{ 粒子発生率})$$

## (7) エネルギー閉じ込め則 (2種)

巾乗則  $\tau_E^P = 0.103 M^{0.5} \kappa^{0.25} I_p^{0.85} \bar{n}^{0.1} B^{0.3} a^{0.8} R^{0.5} P^{-0.5}$

Offset Linear則  $\tau_E^O = C_1 M^{0.5} \kappa a^2 + C_0 I_p^{1.4} B^{0.4} a^{-0.4} R^{1.4} P^{-1}$   
 $C_1 = 0.085, C_0 = 0.038$

## (8) 粒子閉じ込め則

$$\text{Extended JT-60 則} \quad \tau_p = 0.05 \bar{n}^{-1} (B/4.5)^{\delta} a P^{-0.5}, \quad \delta \approx 1.5$$

2.2  $\beta$  値の限界

$\beta$  値を  $4 \mu_0 n T / B^2$  と定義して、 $\beta$  値限界を

$$\beta < \beta_c (\%) = g \frac{I_p}{aB} \quad (2-1)$$

と書き表わす<sup>1)</sup>とき、 $g \approx 2.4 - 2.7$  の値は広い条件のもとで実現できる。理論では電流分布や  $q$  値をうまく選べば  $g$  は 3.5 以上にもでき、実際に  $g \geq 3$  のプラズマも得られている。しかし  $g \geq 3$  ではしばしば閉じ込めの劣化が生じて分布が変化してしまったり<sup>2)</sup>、ディスラプションの頻度が増す事が認められている。そこで、定常運転領域に対しては、

$$g \leq 2.7 \quad (2-2)$$

を用いるのが適当である<sup>3)4)</sup>。

## 2.3 プラズマ電流の限界

安全係数  $q$  値を  $\phi = 0.95 \phi_s$  ( $\phi$  はポロイダル磁束係数で  $\phi_s$  は表面での値) の磁気面で求め、それを  $q_*$  と書く。 $q_* > 3$  ではプラズマを安定に維持することは困難ではない。

それに対し、 $q_* < 3$  で定常的に安定に維持する事は困難であると考えられる。その理由は第一に、 $q_* \leq 2.5$  程度ではディスラプションの頻度が高くなるので適切ではない。また  $q_* \leq 2.5$  では閉じ込め時間の劣化がしばしば見られている。更に、 $q_* < 3$  で高ベータプラズマの安定性を改善するには壁の安定化に依存せざるを得ない<sup>5)</sup>。しかし、抵抗性シェルを用いると、プラズマ回転のない場合では安定化効果が期待できない。そのため定常運転をめざす場合、プラズマ回転が止まり得ることも考えると、 $q_* < 3$  で  $g$  として (2-2) の値を同時に要求する事はできない。こうした理由から、定常運転時の標準値として

$$q_\psi \geq 3 \quad (2-3)$$

を用いるものとする。

最近、 $q = 3$  の限界を越えて  $q < 3$  領域へディスラプションせずに移行する手法として、加熱法と電流増加法の組み合わせが JT-60 で成功し<sup>6)</sup>、 $q_* < 3$  と

するための手法が  $\beta \ll \beta_0$  では確率されたと言える。このことから、 $q \ll 3$  の領域も、試みる余地は十分残っている。

## 2.4 密度限界

線平均密度  $\bar{n}$  が限界値  $\bar{n}_c$  を超えると、ディスラプションになったり MARFE を生じ閉じ込め時間が劣化を始める。限界値  $\bar{n}_c$  については、

$$\bar{n}_c \sim \frac{I}{a^2} \left( \frac{P}{P_{OH}} \right)^\alpha \quad (2-4)$$

と書き得る。OH加熱の場合、限界密度は、 $I/a^2$ の方が  $B/qR$  より相関がよく<sup>7)</sup>、また、追加熱でJETでは  $\alpha = 0.5$  が主張されている<sup>8)</sup>。外挿に用いるには、 $\alpha = 0.5$  は上限値であろう<sup>8)</sup>。JT-60では必ずしもディスラプションで決まる最高の  $\bar{n}$  の値を追求してはいないが、 $\alpha \approx 0.25$  を得ている<sup>9)</sup>。この値は  $\alpha$  の下限値であり、 $0.25 \leq \alpha \leq 0.5$  と考えられる。JT-60より係数を取って

$$\bar{n}_c = 0.4 \frac{I}{a^2} (0.1P)^\alpha, \quad \alpha = 0.25 \quad (2-5)$$

を用いるものとする<sup>10)</sup>。

## 2.5 エネルギー閉じ込め時間 $\tau_E$

$\tau_E$  のスケーリングは理論的に説明されておらず、経験則による。ただし、外挿性を重んじる立場から、実験データの中で次のものに重点を置く<sup>11)</sup>。①大型装置のLモード、②密度が十分定常になったもの、③電流駆動の場合と矛盾しないもの。Hモードについては、定常運転のシナリオとの関連が十分明らかになっていないので、ここではそれをとりあげない。

現在の所、プラズマ蓄積エネルギー  $W$  に対し、 $W = CP^\alpha$  ( $C$  は  $P$  に依存しない係数で、 $\alpha < 1$ ) とするものと、 $W = W_0 + \tau_1 P$  とするものと、二つのフィッティングについて、統計的見地から良否の差を有意に区別することはできない。そこで巾乗則 (P則) と offset-linear則 (O則) と二つの形式を用いて評価する事にする。両者の差は、現在のデータベースのばらつきによるものである。

P則を形式的に

$$\tau_E = C \frac{I}{P}^{1-\delta_1} L^{1+\delta_2} P^{-0.5+\delta_3} \quad (2-6)$$

と書く。Lは  $(a^2 R)^{1/3}$  なる代表的な長さを指す。大型トカマクの結果のフィッティングとして

$$\tau_E^P = 0.103 M^{0.5} \kappa^{0.25} I_p^{0.85} \bar{n}^{-0.1} B^{0.3} a^{0.8} R^{0.5} P^{-0.5} \quad (2-7)$$

が報告されている<sup>12)</sup>。これはLモードで得られている改善をすべて反映したものではないが、下限を評価するものとして、これを用いる。O則については、下村-小田島則<sup>13)</sup>や種々の offset-linear型の経験則<sup>14)</sup>があるが、ここでは次式のような改善された表式(滝塚則<sup>15)</sup>)を用いる。

$$\tau_E^O = C_1 M^{0.5} \kappa a^2 + C_0 I_p^{1.4} B^{0.4} a^{-0.4} R^{1.4} P^{-1} \quad (2-8)$$

$$C_1 = 0.085, C_0 = 0.038.$$

ここでは、定常電流駆動されている炉心を評価するために $\tau_E$ を用いるのであるが、JT-60では、MA級の電流駆動であっても、 $\tau_E$ はLモード則より悪くない事が示されている。更に、電流駆動プラズマはLモードより改善されるデータもある。全電流を定常維持する場合の評価の第一歩として、(2-7)又は(2-8)を用いるものとする<sup>16)</sup>。

## 2.6 粒子閉じ込め時間 $\tau_p$

定常に密度を維持する場合、 $\tau_p$ は重要なパラメータになる。しかし、 $\tau_p$ は $\tau_E$ に比して余り測定されていない。ここでも、①ダイバータ配位②大型装置という事に重点を置いてスケーリング則を選択するものとする。

JT-60では粒子制御に重点を置いた研究がなされており、ダイバータ実験の結果 $\tau_p$ のスケーリングが得られている<sup>17)</sup>。

$$\tau_p = 0.05 \bar{n}^{-1-\delta_1} P^{-0.5+\delta_2} I_p^0 \quad (2-9)$$

磁場やシステムサイズに対する依存性はモデルにより評価する<sup>18)</sup>。 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ については0.1-0.2程度の不正確さがある様であるが<sup>19)</sup>、ここでは $\delta_1 \cong \delta_2 \cong 0$ と選び、[18]に述べたモデルにもとづき

$$\tau_p = 0.05 \bar{n}^{-1} \left( \frac{B}{4.5} \right)^\delta a P^{-0.5} \quad (2-10)$$

( $\delta \cong 1.5$ 程度)と考える。 $\kappa$ 及びMについての依存性は明かではないので、ここでは取り入れない<sup>20)</sup>。

$\tau_p$ に対し、NBIの入射法が影響を持っている可能性がある。しかし、 $\tau_p$ について、NBI電流駆動する場合であっても、JT-60(垂直方向に近い入射)の結果を外挿する事は可能であろう。実効閉じ込め時間 $\tau_p^*$ ( $\tau_p^* = \tau_p / (1 - \tilde{R})$ )、 $\tilde{R}$ はリサイクリング率がco-injectionで短くcounter-injectionで長くなる事がISX-B<sup>21)</sup>他の実験で知られている。しかし、入射法の $\tilde{R}$ への影響もあり、 $\tau_p$ と比較するとその差はより小さくなる<sup>21)</sup>。

## 2.7 $\alpha$ 粒子閉じ込め

トロイダルリップルによる高速イオンや $\alpha$ 粒子の損失は、高アスペクト比の場合大きくなり得て、表面でのリップル率に強い制限がつく。しかし、精密な解析<sup>22)</sup>によれば、 $R/a \leq 3$ の程度の場合、リップル損失は容易に避けられる事が予言されている。

現状では、fishbone不安定性による制限が予想されている。fishbone不安定性のうち $\alpha$ 粒子で励起される場合については十分理解がゆきわたっておらず、 $\beta_\alpha$ が $1-4\%$ で不安定になるものと予測されている。一応

$$\beta_\alpha < (1 \sim 4) \% \quad (2-11)$$

なる限界があるものとする。

## 2.8 電動駆動効率

電流駆動について、現実的な配位での評価が進みつつある。局所的な効率はさまざまに評価されている<sup>23)</sup>。大型装置に適用するには、中性粒子ビームや波動の近接性や、プラズマの分布も考慮して、現実的な評価が試みられている。

ITER級のパラメータに対し、

$$I_p = \frac{CT}{nR} P_{in} \quad (2-12)$$

と書き、NBIの場合<sup>24)</sup>とICRFの場合<sup>25)</sup>にCを評価すると  $C = 0.026 \sim 0.03$  が得られている。この表式は、NBIの場合  $10 \text{ keV} \lesssim T \lesssim 20 \text{ keV}$ 、ICRFの場合  $5 \text{ keV} \lesssim T \lesssim 20 \text{ keV}$  程度で成立する近似式である。このCの値自体は局所理論の値からも遠くなく、ビームの入射角や、波のスペクトルについて、かなり工夫をしたものであると考えてよい。実際の実験でも、これに近い値は得られている。[24、25]などで考える方法では、十分高い密度まで(2-12)式が成立し、プラズマ中心に電流を励起する事ができる<sup>26)</sup>。ここでは完全駆動条件として

$$C = 0.026 \quad (2-13)$$

を用いる。

## 2.9 粒子及び熱除去

定常維持の観点からは、密度の維持と壁の保護を同時に満たす事が要請され、プラズマパラメータが制限される。低温高密度ダイバータが成立するものとする。

### 低温ダイバータプラズマ

ダイバータ板の損傷を考えると、その前面のプラズマ温度をいかに下げられるかが重要であり、条件として

$$T_{\text{div}} \lesssim 10\text{eV} \quad (2-14)$$

を要請する。ダイバータ直前の温度は

$$T_{\text{div}} = \frac{1}{\gamma G} \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{rad}}}{\Gamma_{\text{out}}} \quad (2-15)$$

で与えられる。ここで $\gamma$ は熱伝達係数、 $G$ はダイバータプラズマによる粒子束増倍率、 $P_{\text{out}}$ は主プラズマからの流出パワー、 $P_{\text{rad}}$ はダイバータ部での遠隔放射冷却項をさす。ここで増倍率 $G$ は、 $\Gamma$ の小さい所では $\Gamma$ とともに急上昇するが、 $\Gamma$ が増していくと漸近的に定数になる。この値はダイバータ板の形、壁の形、ポンプ能力などに依存する。実際、流束の増倍は認められている<sup>27)</sup>。放射損失を無視し、十分条件として

$$T_{\text{div}} \approx \frac{P}{\gamma G \Gamma_{\text{out}}} < 10\text{eV} \quad (2-16)$$

を要請する。

FER 85<sup>28)</sup> に対するシミュレーションの結果によれば<sup>29)</sup>、 $P_{\text{out}} = 60\text{MW}$ 、 $\Gamma_{\text{out}} = 1.2 \times 10^{23}/\text{sec}$ の時 $G > 50$ であり、 $T_{\text{div}} = 60\text{eV}$ が得られている。 $G$ は飽和に達しているものと考え、この値で規格化する。 $\Gamma_{\text{out}} = n V_p / \tau_p$ の表式に(2-10)を代入すると

$$T_{\text{div}} = \frac{2.5\sqrt{P}}{n^2 \kappa a R} \left( \frac{B}{4.5} \right)^\delta < 10\text{eV} \quad (2-17)$$

が要請される。

### 排気

中性粒子の排気速度はダイバータ部付近の粒子密度 $n_{\text{div}}$ に比例する。オープンダイバータ配位(JFT-2M)の解析によれば、密度は $\Gamma_{\text{out}} P_{\text{out}}^{1.1-0.3}$ 程度の依存性が得られている。 $\tau_p$ のスケーリングを代入すると、

$$n_{\text{div}} \sim \bar{n}^{2.2} P^{0.2} \quad (2-18)$$

が予言される。JT-60の結果によれば<sup>19)</sup> ダイバータ部での中性粒子密度 $n_{0\text{div}}$ は

$$n_{0\text{div}} \sim \bar{n}^{2+\delta_1} P^{\delta_2} \quad (2-19)$$

( $\delta_1$  は小さい正の数、 $\delta_2$  は0.5より小さい正の数)が得られており、主プラズマ成分の中性粒子の排気については、必要なnの値のほぼ下限を与えると考えてよい。[29]の例では、 $G \geq 50$ が得られ、(2-17)が満たされる様な場合には、この中性粒子の排気は可能である。

一方、排気束の中で $H_0$ の濃度が主プラズマ中の $\alpha$ 粒子濃度より高くなるか低くなるかは重要な課題である。[29]の例では、 $\Gamma_{\alpha \text{ out}}/\Gamma_{\text{out}} = 6\%$ を仮定し、 $\Gamma_{\text{out}} \sim 10^{24} / \text{s}$ 、 $P = 60 \text{ MW}$ の場合、排気できる $\alpha$ 粒子束が $10^{20} / \text{sec}$ 以上( $S_{\alpha} = 60 \text{ MW} / 3.52 \text{ MeV} \approx 1.06 \times 10^{20} / \text{sec}$ )になり、60 MWの $\alpha$ 粒子生成相当の $\alpha$ 粒子束を排気できる事が示されている。この場合、 $\Gamma_{\alpha \text{ out}} - S_{\alpha}$ の $\alpha$ 粒子束はプラズマ周辺近傍でリサイクリングしている。この例から灰排気の必要条件として

$$\frac{\Gamma_{\text{out}}}{S_{\alpha}} > 10^4 \quad (2-20)$$

という評価を得る。ただし、(2-20)の比の値の确实性や、パラメータ依存性については現在検討が進められている。ここでは例をあげるに止める。

### 3. 運転領域

この章では前章で設定された条件をすべて満たす運転領域がどのような入力パワー及びプラズマ密度で実現されるかを調べる。まず、装置パラメータをITER級の値に固定し、定常運転領域を求める。さらに装置サイズを変化させた時のQ値の増大及び必要加熱パワーの評価を行う。

#### 3.1 標準装置パラメータ

装置パラメータの標準値としてITER級の値を設定し、装置サイズに対する依存性を表わすパラメータとして $\ell$ を導入する。すなわち

$$R = 5.8\ell \text{ [m]}, \quad a = 2\ell \text{ [m]}, \quad B = 4.5 \text{ [T]}, \quad \kappa = 2 \quad (3-1)$$

とする。また重水素と三重水素の混合比は1:1であるとして、イオン質量数 $M = 2.5$ とする。

これらのパラメータを用いると、閉じ込め時間の比例則(2-7)、(2-8)及び(2-10)は

$$\tau_E^P = 1.28 \ell^{1.3} \bar{n}^{0.1} I_P^{0.85} P^{-0.5} \quad [\text{s}] \quad (3-2a)$$

$$\tau_E^O = 1.08 \ell^2 + 0.616 \ell I_P^{1.4} P^{-1} \quad [\text{s}] \quad (3-2b)$$

$$\tau_p = 0.1 \ell \bar{n}^{-1} P^{-0.5} \quad [\text{s}] \quad (3-3)$$

と表わされる。またプラズマ全体のエネルギーバランスの関係

$$\langle nT \rangle = 20.8 P \tau_E V_p^{-1} \quad [10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{keV}] \quad (3-4)$$

を用いると

$$\langle nT \rangle = \begin{cases} 0.029 \ell^{-1.7} \bar{n}^{0.1} I_P^{0.85} P^{0.5} & (3-5a) \end{cases}$$

$$\langle nT \rangle = \begin{cases} 0.025 \ell^{-1} P + 0.014 \ell^{-2} I_P^{1.4} & (3-5b) \end{cases}$$



$$\langle nT \rangle \tau_E = \begin{cases} 0.037 \ell^{-0.4} \bar{n}^{0.2} I_p^{1.7} & (3-6a) \\ 0.027 \ell P [1 + 0.57 I_p^{1.4} P^{-1} \ell^{-1}]^2 & (3-6b) \end{cases}$$

となる。一方、定常運転に必要な条件は

$$(1) \quad \beta (\%) = 0.40 \langle nT \rangle < 0.3 \ell^{-1} I_p$$

$$(2) \quad q_\psi \geq 3$$

$$(3) \quad n < 0.056 \ell^{-2} I_p P^{0.25}$$

$$(4) \quad I_p < 0.0045 \ell^{-1} n^{-1} T P_{in}$$

$$(5) \quad T_{div} = 0.11 \ell^{-2} n^{-2} P^{0.5} < 10$$

$$(6) \quad \ell^2 n^2 P^{0.5} S_\alpha^{-1} > 1.09 \times 10^{-20}$$

と書き表わすことができる。ここで  $P_{in}$  は電流駆動又は加熱に用いられる入力パワー、 $P_\alpha$  は  $\alpha$  粒子による加熱パワーを表わしている。 $P_f$  を全核融合出力パワーとすると

$$P = P_{in} + P_\alpha, \quad P_\alpha = 0.2 P_f \quad (3-7)$$

の関係が成立し、 $\alpha$  粒子の形で得られたパワーはすべてプラズマの加熱に寄与するものと仮定する。

### 3.2 核融合出力

全核融合出力  $P_f$  はプラズマ体積内での核融合出力を積分することにより次のように表わすことができる。

$$P_f = \frac{1}{4} (1-2f_\alpha)^2 E_f \int \langle \sigma v \rangle n_e^2 dV \quad (3-8)$$

ここで  $f_\alpha \equiv n_\alpha / n_e$  は  $\alpha$  粒子の密度比であり、重水素 (D) と三重水素 (T) の密度比、 $n_D / n_e = n_T / n_e = (1 - 2 f_\alpha) / 2$  とともにみな空間的に一様であると仮定している。また一回の D-T 核融合反応により放出されるエネルギー  $E_f$  は 17.6 MeV と考える。燃料イオンの速度分布関数はほぼマクスウェル分布であると仮定すれば<sup>31)</sup> D-T 核反応特性  $\langle \sigma v \rangle$  はイオン温度  $T_i$  (keV) の関数として次の様に表わされる<sup>32)</sup>。

$$\langle \sigma v \rangle = 3.7 \times 10^{-18} \frac{1}{T_i^{2/3}} \exp\left(\frac{-20}{T_i^{1/3}}\right) \frac{1}{h} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3-9)$$

$$h = \frac{T_i}{37} + \frac{5.45}{3 + T_i \{1 + (T_i/37.5)^{2.8}\}}$$

ここで電子密度  $n_e(\rho)$  およびイオン温度  $T_i(\rho)$  の小半径方向分布が、規格化半径を  $0 \leq \rho \leq 1$  とし、それぞれ

$$n_e(\rho) = (1 + \alpha_n) \langle n_e \rangle (1 - \rho^2)^{\alpha_n} \quad (3-10a)$$

$$T_i(\rho) = (1 + \alpha_T) \langle T_i \rangle (1 - \rho^2)^{\alpha_T} \quad (3-10b)$$

であると仮定することにより、 $P_f$  は数値積分により求められる。べき数  $\alpha_n$ 、 $\alpha_T$  を決め、体積平均イオン温度  $\langle T_i \rangle$  (keV) を変えて積分した結果から、次の様な実用的な近似式を得ることができる。

$$P_f = C_0 (1-2f_\alpha)^2 V_p \langle n_e \rangle^2 \left(\frac{\langle T_i \rangle}{10}\right)^\nu \exp\left\{-C_1 \left(\frac{\ln(\langle T_i \rangle / 10)}{\ln 2}\right)^2\right\} \quad [\text{MW}] \quad (3-11)$$

ここで、 $\langle n_e \rangle$  は  $10^{20} \text{m}^{-3}$  で規格化された体積平均電子密度である。係数  $C_0$ 、 $\nu$ 、 $C_1$  は  $\alpha_n$ 、 $\alpha_T$  の値により変化し、例えば表 1 のような値をとる。

表 1 べき数  $\alpha_n$ 、 $\alpha_T$  に対する係数  $C_0$ 、 $\nu$ 、 $C_1$  の値

$\alpha_n$	$\alpha_T$	$C_0$	$\nu$	$C_1$
1	1	2.53	1.75	0.357
0.3	1	1.47	1.85	0.342
0.1	0.5	0.98	2.21	0.357
0	0	0.77	2.52	0.386

平均温度  $\langle T_i \rangle$  が 5 keV から 20 keV の範囲では、この近似式の誤差は 2% 以内である。このような近似式は  $\alpha_n = 1$ 、 $\alpha_T = 1$  のときに [25] において初めて示された。以下では  $\alpha_n = 0.3$ 、 $\alpha_T = 1$  を用いて計算する。炉の性能を表わす 1 つの指標、核融合出力増倍係数  $Q$  は

$$Q = \frac{P_f}{P_{in}} \quad (3-12)$$

により定義される。

### 3.3 定常運転領域

装置パラメータを定めると、プラズマ電流の上限は  $q_*$  の値によって決定される。ITER についての平衡計算により  $I_p = 20 \text{ MA}$  が  $q_* = 3$  に対応することが示されている。従って、装置サイズの変化を考慮に入れて  $I_p = 10 \ell \sim 20 \ell$  [MA] の領域を考えることにする。

まず巾乗則  $\tau_E^p$  を用いた場合の動作領域を入力パワー  $P_{in}$  と線平均密度  $\bar{n}$  の平面上で示したのが図 1 および図 2 である。標準パラメータ ( $\ell = 1$ ) について  $I_p = 20 \text{ MA}$  を図 1 に、 $I_p = 10 \text{ MA}$  を図 2 に示す。各実線は定常運転の必要条件 (1) ~ (6) を表わし、破線は等温度線、一点鎖線は等  $Q$  線を示している。

$I_p = 20 \text{ MA}$  の場合 (図 1)、 $160 \text{ MW} < P_{in} < 1.5 \text{ GW}$ 、 $0.44 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} < \bar{n} < 1.9 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  の範囲にある三角形領域が定常運転可能領域である。最も入力パワーが少ない動作点は電流駆動条件 (4) と低温ダイバータプラズマ条件 (5) によって定まり、 $P_{in} = 160 \text{ MW}$ 、 $\bar{n} = 0.44 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  となった。この動作点では  $T = 11 \text{ keV}$ 、 $\tau_E = 1.04 \text{ s}$ 、 $Q = 1.5$  である。 $Q$  値を最大にする動作点は限界  $\beta$  値 (1) と電流駆動条件 (4) によって定まるが、必要入力パワーは 1 GW という非常に大きな値となる。電流駆動が有効である場合には限界密度値の条件は十分満たされている。また灰除去の条件も容易に満たすことができる。

$I_p = 10 \text{ MA}$  の場合、(図 2) には最小必要入力パワーはわずかに減少し、145 MW となるが、プラズマ温度が 5.6 keV となって  $Q$  は大幅に減少して 0.34 となる。 $I_p$  を増大させても必要パワーがほとんど変化しないのは、電流の増加とともに  $\tau_E$  が改善され、温度が上昇し、電流駆動効率が向上するためである。

次に offset-linear 則  $\tau_E^o$  を用いた場合を図 3 および図 4 に示す。 $I_p = 20 \text{ MA}$  (図 3) の場合には入力パワー最小の動作点は  $P = 130 \text{ MW}$ 、 $\bar{n} = 0.43 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  に移動するが、巾乗則からの変化は比較的小さい。これは加熱パワーが余り大きくなく、巾乗則と offset-linear 則との差が未だ顕著でないためである。しかし、限界  $\beta$  値は閉じ込めの向上を反映して低パワー側に移動している。また (3-5b) 式からわかるように、 $\langle nT \rangle \tau$  は全加熱パワーとともに増大するため、巾乗則に比べて  $Q$  値は大きい。入力パワー最小の動作点では  $T = 13$

k e V、 $\tau_E = 1.28$  s で  $Q$  は 2.3 に達している。また定常運転領域内ではないが、 $\bar{n} > 10^{20} \text{ m}^{-3}$  の場合には入力パワーが 160 MW を越えると急激に  $Q$  が増大し、自己点火に到達していることがわかる。しかしながら自己点火に達すると  $\beta$  が大きくなり、限界  $\beta$  値を越えている。比較のために  $I_p = 10$  MA の場合を図 4 に示す。定常運転領域は少し低入力側に移動し、 $Q$  値も減少する。最小パワーは 93 MW となり、そこでの  $Q$  値はおよそ 1 となる。 $I_p$  が 10 MA と 20 MA の場合を比較すると、 $\tau_E$  が P 則に従えば、 $I_p = 20$  MA の場合が有利である。 $\tau_E$  が O 則の場合でも、 $I_p = 20$  MA の方が大きい  $Q$  値が得られ、やや有利であると言えよう。従って、次節以下では  $I_p = 20$  MA ( $q_a = 3$ ) の場合を検討する。

### 3.4 装置サイズ依存性

次に、定常運転条件を満たす入力パワー最小の動作点が装置サイズにどの様に依存するかを調べる。この動作点は電流駆動条件と低温ダイバートプラズマ条件から定まっている。必要駆動電流値 (4) を  $Q \ll 5$  すなわち  $P \approx P_{in}$  の条件の下で密度に対する制限として書きかえると

$$n < 0.009 P^{0.79} \ell^{-1.42} I_p^{-0.08} \quad \text{for } \tau_E^P \quad (3-13a)$$

$$n < 0.01 P \ell^{-1} I_p^{-1/2} \quad \text{for } \tau_E^O \quad (3-13b)$$

となる。 $\tau_E^O$  については入力パワーは十分大きいと仮定している。一方、 $T_{div} < 10$  e V を満たすためには

$$n > 0.105 P^{1/4} \ell^{-1} \quad (3-14)$$

でなければならない。従って入力パワー最小の動作点では

$$P_{min} = 94.6 \ell^{0.78} I_p^{0.15}, \quad n = 0.33 I_p^{0.04} \ell^{-0.8} \quad \text{for } \tau_E^P \quad (3-15a)$$

$$P_{min} = 23 I_p^{2/3}, \quad n = 0.23 I_p^{1/6} \ell^{-1} \quad \text{for } \tau_E^O \quad (3-15b)$$

となる。もし  $I_p \propto \ell$  の場合には  $P_{min} \propto \ell^{0.93} (\tau_E^P)$ 、 $P_{min} \propto \ell^{2/3} (\tau_E^O)$  となり、装置が大型になると offset-linear 則が成立した場合の方が必要パワーの増大が少なくすむことがわかる。なおこの動作点での温度は  $T = 220 \times \ell n I_p / P_{min}$  で与えられ、

$$T = 0.76 \ell^{-0.58} I_p^{0.89} \quad \text{for } \tau_E^P \quad (3-16a)$$

$$T = 2.2 I_p^{1/2} \quad \text{for } \tau_E^0 \quad (3-16b)$$

となる。

核融合出力の効果を入れて計算した結果を図5 (P則) と図6 (O則) に示す。ここでは  $q_0 = 3$  を満たすように  $I_p = 20 \text{ MA}$  に選んでいる。実線は必要入力パワーと密度を表わし、破線はその時の温度、一点鎖線はQ値を示している。巾乗則を用いた場合 (図5) にはQが小さく、近似式 (3-15a)、(3-16a) とよく一致している。offset-linear則を用いた場合には、装置サイズが大きくなると、 $\alpha$ 粒子加熱の効果により温度が上昇し、必要パワーがほとんど増加しなくなることがわかる。

次に定常運転領域内でQ値が最大となる動作点の装置サイズ依存性を図7 (P則) 図8 (O則) に示す。Q値最大の動作点は  $P_{in}$  の上限を与える限界 $\beta$ 値条件の線上にある。しかしP則の場合、Q値は  $T \sim 8 \text{ keV}$  で最大となるため、最適密度は装置サイズやプラズマ電流に依存する。 $I_p = 20 \text{ MA}$  ( $\ell > 1$ ) の場合には、定常運転領域の温度が  $8 \text{ keV}$  を越えているため、Q値最大の動作点は電流駆動条件 (4) と限界 $\beta$ 値条件 (1) によって定まると考えてよい。巾乗則を用いた図7では  $\ell = 1.4$  で  $Q = 5$  に達し、その時  $P_{in}$  は  $1.4 \text{ GW}$  である。一方、offset-linear則を用いた場合 (図8) では  $\ell = 0.8$  ですでに  $Q = 5$  に達しているが、入力パワーは装置サイズに余りよらず  $200 \text{ MW}$  程度必要である。

### 3.5 ブートストラップ電流の効果

これまでの計算では電流駆動効率を増大させるブートストラップ電流の効果が取り入れられていない。ブートストラップ電流の大きさは一般に

$$I_{BS} = C \sqrt{\frac{a}{R}} \beta_p I_p \quad (3-17)$$

で与えられ、係数Cは密度、温度、電流の空間分布によって決まる定数である。ここでは  $\alpha_n = 0.3$ 、 $\alpha_T = 1$  の場合について [24] によって計算された結果を用いて

$$I_{BS} = 10 \frac{\langle nT \rangle}{I_p} \ell^2 \quad [\text{MA}] \quad (3-18)$$

とする。図9 (P則)、図10 (O則) を図1、図3と比較すると明らかなように、 $P_{min}$  は10%程度減少する。しかし入力パワーの減少とともに温度が低下するためQ値は減少している。顕著な場合としてO則の  $P_{in} \approx 200 \text{ MW}$  の場合を比較すると、ブートストラップ電流のある場合と無い場合で  $Q_{max}$  に於て  $Q = 8.5$  (無) と  $Q \approx 11.5$  (有) 程度の差が見られる。

### 3.6 中性子壁負荷

装置サイズに比して核融合反応出力が大きいと中性子の壁負荷  $P_N$  が高くなる。その上限値としては  $1 \sim 1.5 \text{ MW/m}^2$  と考えられている。  $P_N = 1 \text{ MW/m}^2$  と  $1.5 \text{ MW/m}^2$  の条件を  $P_{in} - \bar{n}$  平面上に太破線で示したのが図11 (P則)、図12 (O則) である。  $P_N$  の上限として  $1 \text{ MW/m}^2$  と考えると、入力可能パワーの上限は限界  $\beta$  値ではなく壁負荷で決まることになる。

#### 4. まとめと討論

本報告ではITER級のトカマク装置を想定し、2章で与えられた様な拘束条件の整合性を既存の比例則の外挿をもとにして、検討した。「定常運転」を目標とした場合、全部の条件が満たされる動作領域を探し、入力パワー ( $P_{in}$ ) - 密度 ( $\bar{n}$ ) 面上で領域を確認した。

動作領域は電流駆動効率の条件と、低温ダイバータプラズマ条件と限界 $\beta$ 値で決まる三角形の領域となる。この場合は、限界密度や粒子除去は余り問題にならない。この領域は比例則の違いにより、低い入力パワーの所で必要最小入力パワーに、2、3割の差がある。現在使われているLモード則の中乗則(P則)を採用すると、最小入力パワーとして $P_{in} = 160$  MW程度必要であり、 $\bar{n} = 0.44 \times 10^{20} / m^3$ 、 $T \approx 11$  keVのオーダーのプラズマが生成され、Q値は1.5程度である。offset-linear則(O則)の場合には入力130 MW程度で運転領域に入り、 $Q \sim 2$ が得られた。ここでは $\alpha$ 粒子の核融合による反応出力を全部プラズマ加熱に使用できると仮定しており、高エネルギー粒子の閉じ込めが十分良い事が必須である。この様に閉じ込めが良い場合でO則の場合には、入力パワー $P_{in} = 220$  MW、 $\bar{n} \sim 0.9 \times 10^{20} / m^3$ 位の動作点で $Q \approx 8$ が可能になる。

また $I_p = 10$  MAと20 MAの場合について、Q値を比較すると $I_p$ を10 MAに選ぶメリットはなく、 $q_e = 3$ で規定される $I_p = 20$  MAを選ぶべきである事が判明した。

灰除去については初期的な解析結果として、 $\Gamma_{out} > 10^4$  S<sub>0</sub>が要請されている。この条件が適用できるとすれば、ここで取り扱ったパラメータを考えた場合には、動作領域に影響しない。低温ダイバータプラズマから要請される条件は、ダイバータ配位の変化(オープンからクローズドダイバータへ)や装置の幾何学的形状の変更によって改善される可能性は、十分ある。この改良によって動作領域は低密度側へ広がり得て、低いパワーでこの動作領域に入り得る。しかし、Q値の等高線表示から分かる様にプラズマ性能の改善には直接にはつながらない。

高密度側を規定しているのが電流駆動の効率である。本報告で使用されている効率は現在考えられている駆動方法のほぼ最適値を使用しており、楽観的な評価になっている。この拘束条件の改善は動作領域を広げるばかりでなく、高いQ値側に動作領域を移動する事であり、意味する所は大きい。

ブートストラップ電流の存在が運転領域やQ値の上昇に与える影響の検討も行った。ブートストラップ電流の存在は、運転領域を高密度側に少し広げる。Q値の上昇についてはP則の場合には、この運転領域では余り望めない。O則の場合には入力パワー200 MW程度でQ値が8.5位の時にはこの電流の影響によって $Q \approx 11.5$ 位まで上昇することが示された。低入力パワーの所ではQ値の上昇は余り望めない。運転領域を広げるためには、駆動効率の高い刷新的な電流駆動方法の考案が望まれる。

同じ拘束条件のもとに装置規模を $\ell$ 倍変化させた時に(同時に電流値も $\ell$ 倍される)動作領域や、Q値にどのような影響があるのかも調べた。動作領域に入るこ

とのできる最小密度と最小入力パワーの評価もした。これによると装置を大きくするにつれ動作領域は低密度側、高入力側に移動する。動作領域内のQ値はサイズの上昇により増加を示すことが判明した。

また核融合反応出力が大きい場合には、中性子による壁負荷が高くなる。その条件の検討も行なった。

注意すべき事は、比例則としてP則を採るか、O則を選ぶかで運転領域におけるQ値や必要入力パワーの定量的な評価は大きくずれる事である。例えば”Q=5、定常運転”という条件は $q_w = 3$ の条件で

P則	サイズ	1.4倍,	入力	1.4 GW ( $\bar{n}=1.6$ )
O則	サイズ	0.8倍,	入力	220 MW ( $\bar{n}=1.0$ )

である。現状では両者を区別する事は難しい。

以上の評価には、1) 核融合出力の評価において空間分布を仮定している事、2) 生成 $\alpha$ 粒子の損失を無視している事、3)  $\alpha$ 粒子の電流駆動に対する影響(例えば、速波による電流駆動では、 $\alpha$ 粒子による波の吸収により駆動効率が下がる)を無視していること、など未解決の事が多く残っている。

最小必要入力が多い原因は、閉じ込め比例則で示される様な、プラズマ閉じ込めの悪さである。より低い入力で条件を満たすために、閉じ込め改善の方法や配位を探す研究が必要である。



## 参 考 文 献

- 1) F. Troyon, et al., Plasma Phys. Controll. Fusion 26 (1984) 209
- 2) O. Gruber, et al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986 (Vienna, 1987) Vol.1, 357
- 3) K. McGuire, et al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986 (Vienna, 1987) Vol.1, 421 に示されている様に、T F T R では、 $q > 5$  の領域で  $\beta_p$  が  $0.7 R/a$  に達すると、ディスラプションや強い MHD モードが認められており、 $g = \text{定数}$  という関係は、実験で必ずしも一般的に検証されているとは言い難い。しかし、 $q \sim 3$  付近では、(2-1)、(2-2) は実験データベースがあるものと考えられる。
- 4)  $g$  の値を電流分布制御によって向上させる可能性はある。重要な検討課題ではあるが、現在データベースはない。
- 5) T. Tsunematsu, private communication (1987)
- 6) JT-60 Team, JAERI-M 88-063 (1988), § 8
- 7) M. Greenwald, et al., Research Report PFC/JA-86-22 (MIT, 1986)
- 8) F. C. Schuller, et al., Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 12th Europ. Conf., Budapest 1985) Vol.1, 151  
放射損失  $P_{rad}$  を  $Z_{eff} \bar{n}^2$  に比例すると考えると、 $n$  が増加すると、 $Z_{eff}$  は普通、ある値に止まり、 $P_{rad} \propto \bar{n}^2$  と漸近的に振舞うと考えられる。 $P_{rad} < P$  が必要なので、 $\alpha = 1/2$  は上限であろう。
- 9) JT-60 Team, JAERI-M 88-063 (1988), § 2
- 10) 高密度限界付近で認められる現象は、MARFE, Detached Plasma, Locked mode, Disruption などで、表面近傍の放射冷却と、MHD 波動の協力現象である。従って、2-3 章で述べた様に、 $q = 2, 3$  有理面近傍の局所的加熱によって改善される希望はもてる。当面は  $\bar{n}_c$  としてこの値を用いるものとする。
- 11) 定常運転では密度の制御が大事な要因である。定常に密度を維持している場合、プラズマ粒子源は表面近傍に限られるであろう。その意味でも小半径の大きなものに重きをおく。

- 1 2) S.M.Kaye, presented in ITER specialist meeting (1988)
- 1 3) Y. Shimomura and K. Odajima, Comments. Plasma Phys. Cont. Fusion 10 (1987) 207; Y. Shimomura, et al., JAERI-M 87-080 (1987); K. Odajima and Y. Shimomura, JAERI-M88-068 (1988).
- 1 4) J T-60 では  $W = C_0 I_p^{1.9} + C_1 a^2 P$  が提案されている (Naito, et al., EPS(1988))。また、J E Tからは  $\tau_1 \propto I$  という説や、 $\tau_1 \propto I$  (低い  $I/B$  値) から  $I$  とともに劣化 (高い  $I/B$  値) という報告もされている (Jacquinot, EPS(1988))。O 則自体にもこの様なばらつきがある。
- 1 5) offset-linear 則では、蓄積エネルギー  $W = W_0 + \tau_1 P$  の offset 分  $W_0$  はオーミック加熱プラズマの蓄積エネルギーにほぼ等しいと考えられる； $W_0 \approx I_p V_L \tau_E$ 。ここでプラズマループ電圧  $V_L$  は  $V_L \sim I_p R Z_{eff} / \kappa a^2 < T_e >^{1.5}$  となることが実験結果から確かめられる。もし、プラズマ中心安全係数  $q(0)$  が 1 であると仮定すると  $V_L \sim B Z_{eff} / T_e(0)^{1.5}$  となるが、これは実験結果と著しく異なっている。電子密度の高い領域では、実効電荷数  $Z_{eff}$  はほぼ一定値となり、またエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  は  $\tau_E \sim M^{0.5} \kappa a R B$  の経験式で近似される値で飽和する。追加熱時では一般的に密度は  $\tau_E$  の飽和領域にある。平均電子温度  $< T_e >$  と  $W_0$  はほぼ  $\kappa a^2 R < n_e > < T_e > \sim W_0$  の関係にある。以上の関係式をまとめると

$$W_0 \sim I_p^{0.8} B^{0.4} \kappa^{0.6} a^{0.8} R^{1.4} < n_e >^{0.6} M^{0.2} \quad (i)$$

が得られる。この  $W_0$  を追加熱プラズマ閉じ込め比例則の offset 分として用いると、 $\tau_E$  は密度  $< n_e >$  に強く依存する事になる。しかし T F T R や J T-60 の高パワー加熱実験結果では  $\tau_E$  の  $< n_e >$  依存性は弱い事が示されている。従って (i) 式中の  $< n_e >$  として、 $\tau_E$  の飽和領域による特徴的な  $< n_e >$  の値、 $< n_e > \sim M^{1/2} I_p / \kappa a^2$ 、を代入すれば良いと考えられる。つまり

$$W_0 \sim I_p^{1.4} B^{0.4} a^{-0.4} R^{1.4} M^{0.5} \quad (ii)$$

が得られる。増分閉じ込め時間  $\tau_1$  については文献 [13] の表式； $\tau_1 = 0.085 M^{1/2} \kappa a^2$  [s] を採用して式 (2-8) を得る。詳細については別途報告する予定である。

- 1 6) J T-60 での電流駆動は L H によるものであり、そこでは電子の分布がテイル分布を伴っている。閉じ込め時間の電流駆動による改善の理由につ

いて、現在の所、そうしたテイル分布ではなく、内部インダクタンスなど巨視的な平衡量の変化によるものとなっている。それが正しいなら、電流駆動による $\tau_E$ の改善は、駆動法には直接は依存しない事になり、いろいろな駆動法でも期待できる事になる。

また、NBIで電流駆動する場合、プラズマの回転も問題になり得る。 $\tau_E$ の回転に対する依存性はTFTRで調べられている。現在の所、回転が大きい場合はLモードになる。バランス入射での改善は、NBIの荷電交換率の問題と考えられている。スーパーショットは定常維持が当面は難しい様であり、ここでは、それに依存しない。

- 17) S. Tsuji, et al., in Proceedings of 14th European Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics (Madrid, 1987) Vol.1, P.57
- 18) 表面近傍にプラズマ粒子が供給される場合、 $\tau_p$ は $a v_0 / S n_e D(a)$ という表面近傍のプラズマパラメータで与えられる。(  $v_0$  は中性粒子速度、 $S$  は電離断面積に比例する量で $D$ は拡散係数。) ここでスクレイプオフ層の解析(Lackner)から、 $T(a) \propto P^{4/11} \ell^{-2/11} B^{4/11} I_p^{-2/11} n_b^{-2/11}$ というスケールリングが与えられる。(  $\ell$  はSOLでの代表的長さ、 $n_b$  は境界での密度)。  $P$  による $\tau_p$ の劣化を説明するために、 $D \propto T/B^2$ という作業仮説をとる。これ等の関係から、 $\tau_p \propto P^{-4/11} a^1 B^{1.6} I_p^{0.2} n_b^{0.2} n^{-1} \ell^{0.2}$ を得て、 $P$ による劣化、 $1/n$ の依存性と $I_p$ への弱い依存性を再現し得る。
- 19) H. Nakamura, and JT-60 Team, Nucl. Fusion 28 (1988) 43
- 20) Macrotor では $\tau_p \propto \sqrt{M}$ を報告している。(Nucl. Fusion 25 1173) しかし、ダイバータ配位ではなく、ここで考える状況とは異なるので、ここでは採用しない。
- 21) J. Mathew, et al., ORNL/TM-9386 (1986)
- 22) T. Takizuka, et al., ITER 専門家会議報告 (1988) による
- 23) 例えばN. T. Fisch and C. F. F. Karney, Phys. Fluids., 24 (1981) 27
- 24) S. Yamamoto, et al., Plasma Phys. Controlled Nucl. Fusion Research 1986 (IAEA, Vienna, 1987) Vol.3, P.267
- 25) Y. Kishimoto, et al., JAERI-M 87-204 (1987)

- 26) NBIではプラズマの回転を伴う事になる。Scott の評価によれば (ITER 専門家会議発表)、 $P_{NBI} < 50 \text{ MW}$  の時、 $v_{*} / c_s$  は TFTR の現在のレンヂより小さい。回転によって TFTR では特に不安定性が励起される様な事はないので、この入力の間程度では、不安定性が生じるとは考えなくともよかろう。しかし、回転のもたらす不安定性については、未だ解析が進んでいないので、(2-12) が成立する P の領域の上限について、検討が必要である事も念頭におくべきであろう。
- 27) Y. Shimomura, et al., Nucl. Fusion 23 (1983) 869
- 28) Y. Sawada, et al., JAERI-M 86-134 (1986)
- 29) K. Itoh, et al., Research Report HIFT-154 (Hiroshima, 1988)
- 30) S.-I. Itoh, et al., paper in preparation
- 31) 中性粒子ビーム入射による電流維持においては、燃料イオンの速度分布関数にテイル成分があり  $\langle \sigma v \rangle$  は増大するが、ここではこの効果を考えない。
- 32) T. Takizuka and M. Yamagiwa, JAERI-M 87-066 (1987).

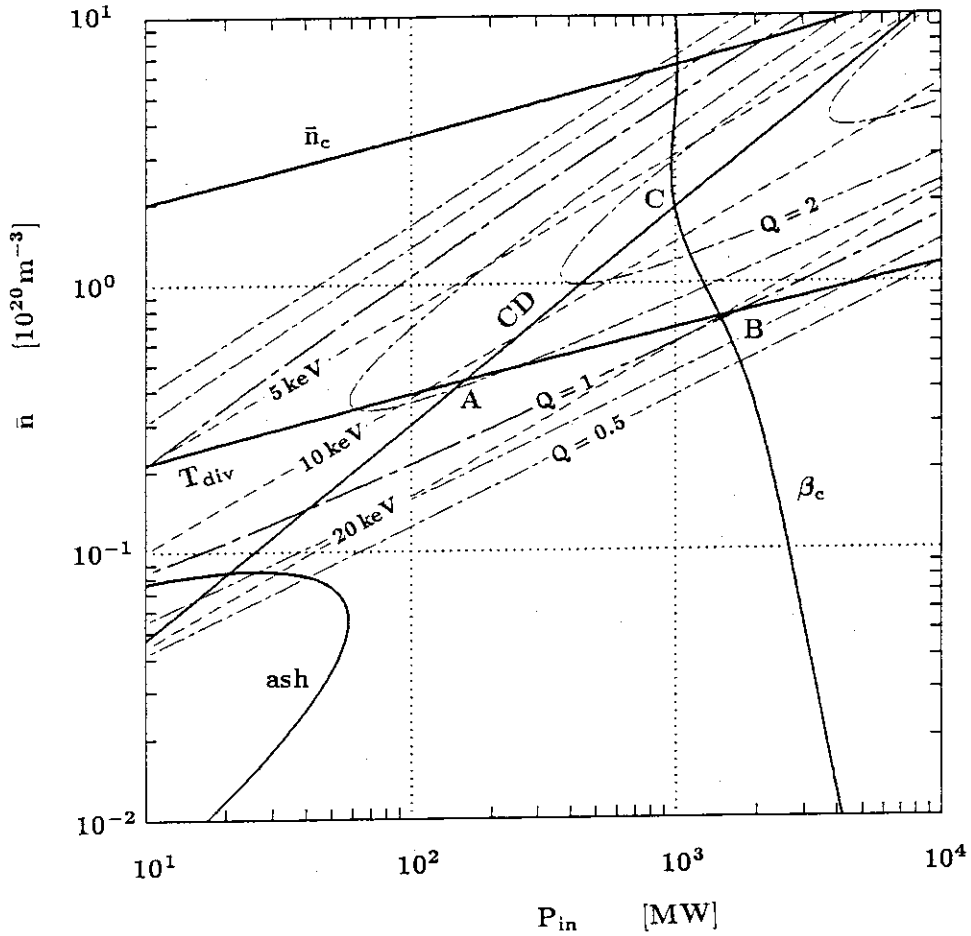


図1 入力パワー  $P_{in}$  と線平均密度  $\bar{n}$  平面上の動作特性。装置サイズは標準値 ( $\ell = 1$ )、 $I_p = 20 \text{ MA}$ 、エネルギー閉じ込め則として巾乗則 ( $P$  則) を選んでいる。太実線  $n_c$  は密度限界 (この線の下方が運転可能領域)、 $T_{div}$  は低温ダイバータプラズマ条件 (上方可能領域)、 $CD$  は完全電流駆動 (下方可能領域)、 $\beta_c$  は限界ベータ値 (左方可能領域)、 $ash$  は灰排気 (右上方可能領域) を示す。 $ABC$  に囲まれたほぼ三角形の領域が全条件を満たす定常運転可能領域である。破線は等温度線 ( $T = 5 \text{ keV}$ 、 $10 \text{ keV}$ 、 $20 \text{ keV}$ )、一点鎖線は等  $Q$  線 ( $Q = 0.5$ 、 $0.7$ 、 $1$ 、 $1.5$ 、 $2$ 、 $3$ ) を示す。ここでは定常運転の必要最小入力パワーは  $A$  点で  $P_{min} = 160 \text{ MW}$  ( $Q = 1.5$ ) である。またほぼ  $C$  点で最大  $Q$  値、 $Q = 2.5$  ( $P_{in} = 1 \text{ GW}$ ) が得られる。

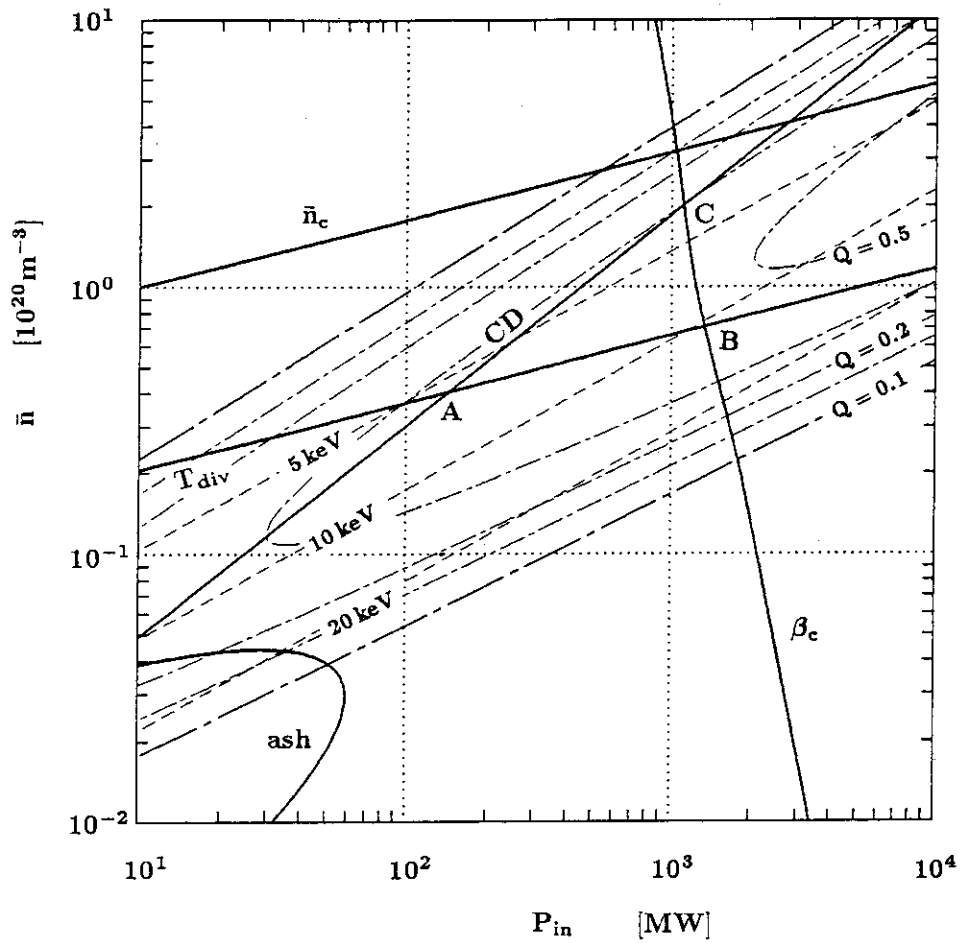


図2 標準サイズ ( $\ell=1$ )、 $I_p=10\text{MA}$ 、P則の場合の動作特性図。等Q線は $Q=0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5$ で描かれている。A点において $P_{min}=145\text{MW}$ 、 $Q=0.35$ 、BC線分上で $Q_{max}=0.45$ 、 $P=1.2\text{GW}$ である。 $I_p=20\text{MA}$ に比べて $I_p=10\text{MA}$ にする利点は見られない。

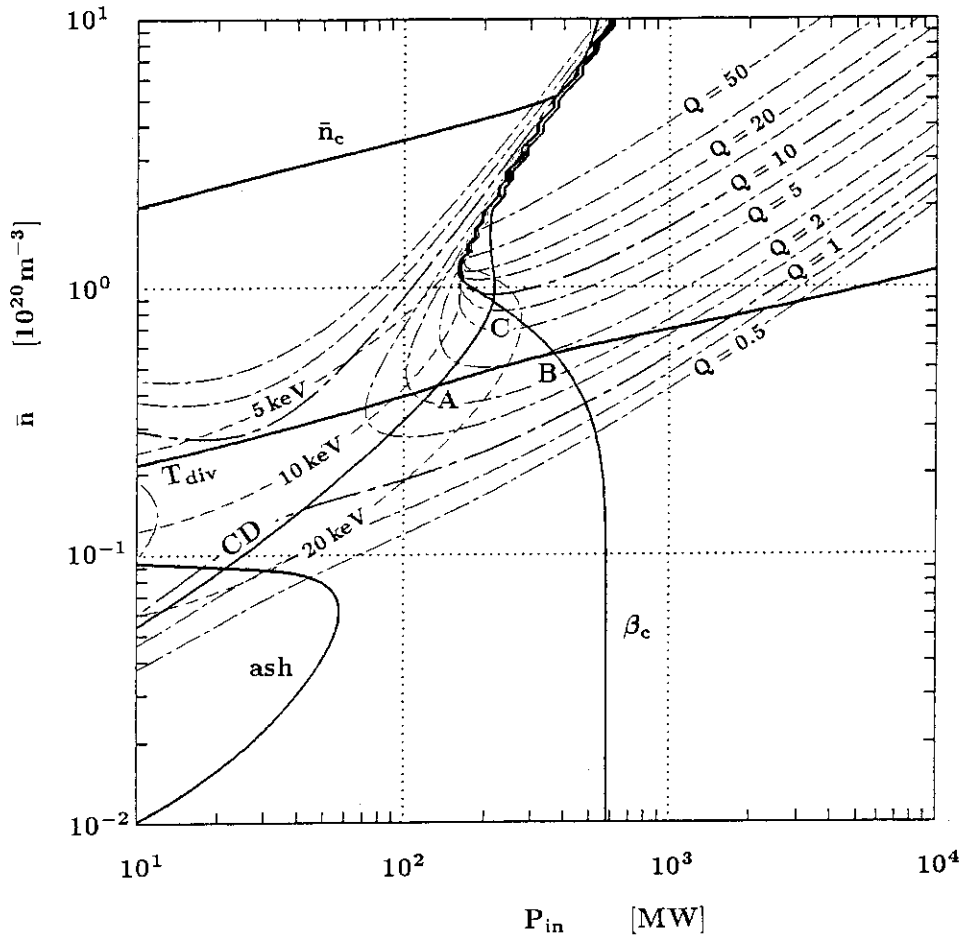


図3 offset-linear型閉じ込め則（O則）を選んだときの動作特性図。標準サイズ（ $\ell=1$ ）、 $I_p=20\text{ MA}$ 。等Q線は $Q=0.5、0.7、1、1.5、2、3、5、7、10、15、20、30、50$ で描かれている。A点において $P_{min}=130\text{ MW}$ 、 $Q=2.3$ 、C点において $Q_{max}=8.5$ 、 $P=215\text{ MW}$ である。

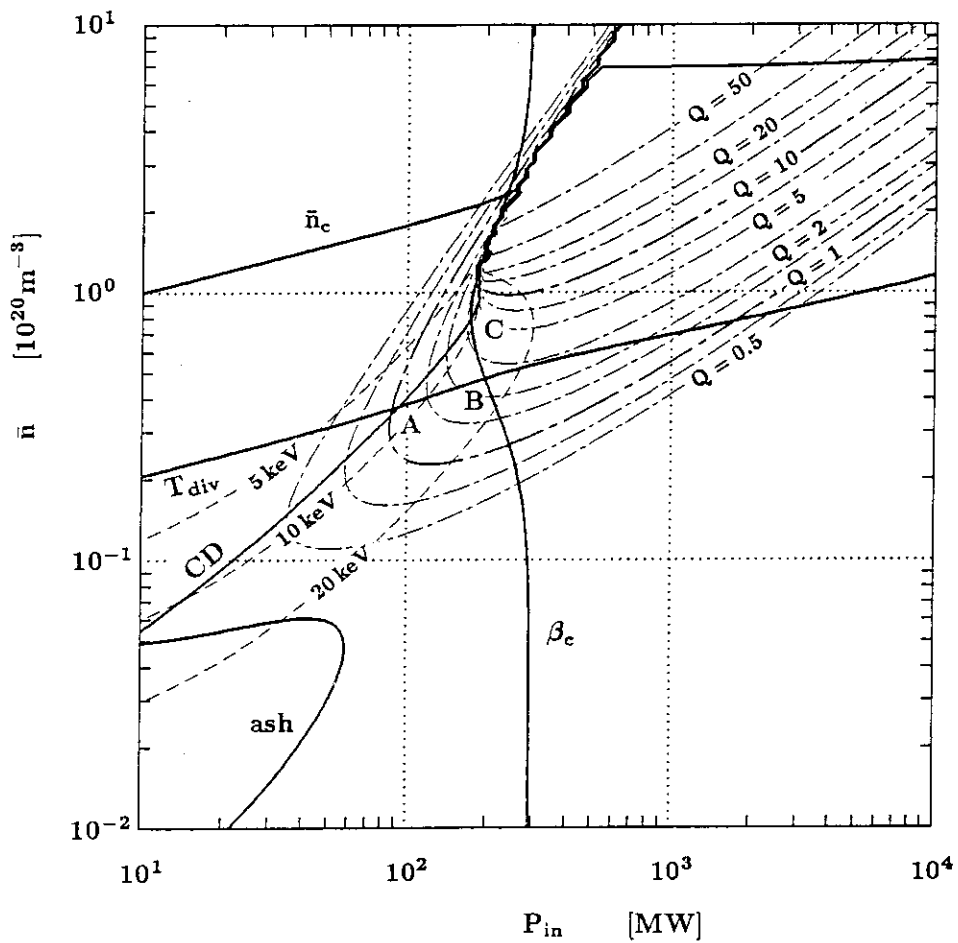


図4 標準サイズ ( $\ell = 1$ )、 $I_p = 10 \text{ MA}$ 、 $\text{O}$  則の場合の動作特性図。A 点において  $P_{\min} = 93 \text{ MW}$ 、 $Q = 1$ 、C 点において  $Q_{\max} = 3.4$ 、 $P = 180 \text{ MW}$  である。



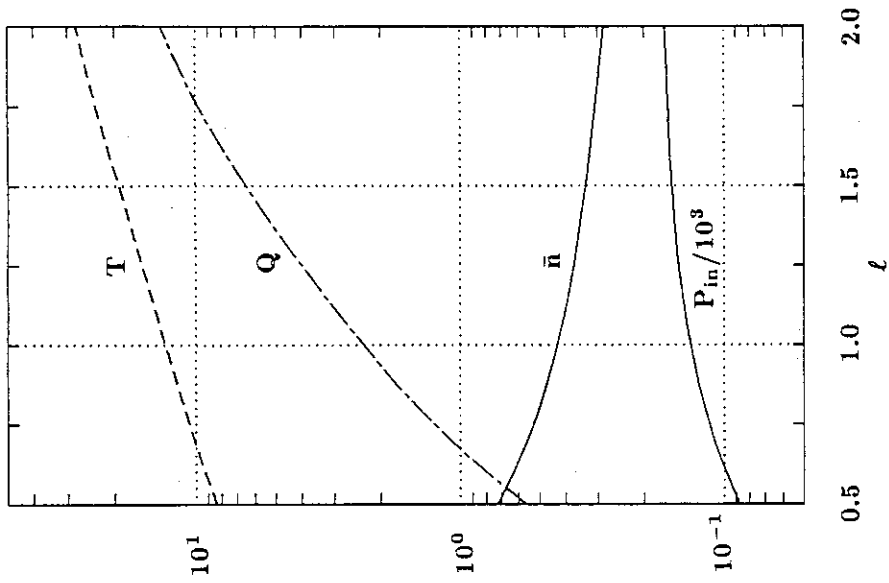


図6 O 則の場合の必要最小入力  $P_{min}$  の装置サイズ依存性。  $R = 5.8 \ell m$ 、  $a = 2 \ell m$ 、  
 $I_p = 20 \ell MA$ 。

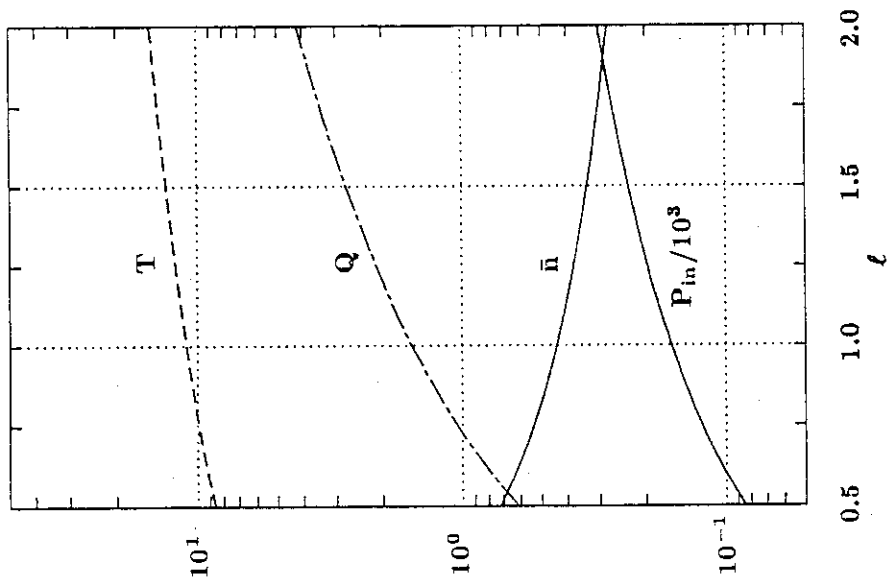


図5 P 則の場合の必要最小入力  $P_{min}$  の装置サイズ依存性。動作点 A での線平均密度  $\bar{n}$  を破線で、温度 T を破線で、また Q 値を一点鎖線で示す。主半径は  $R = 5.8 \ell m$ 、小半径は  $a = 2 \ell m$ 、プラズマ電流は  $I_p = 20 \ell MA$  である。

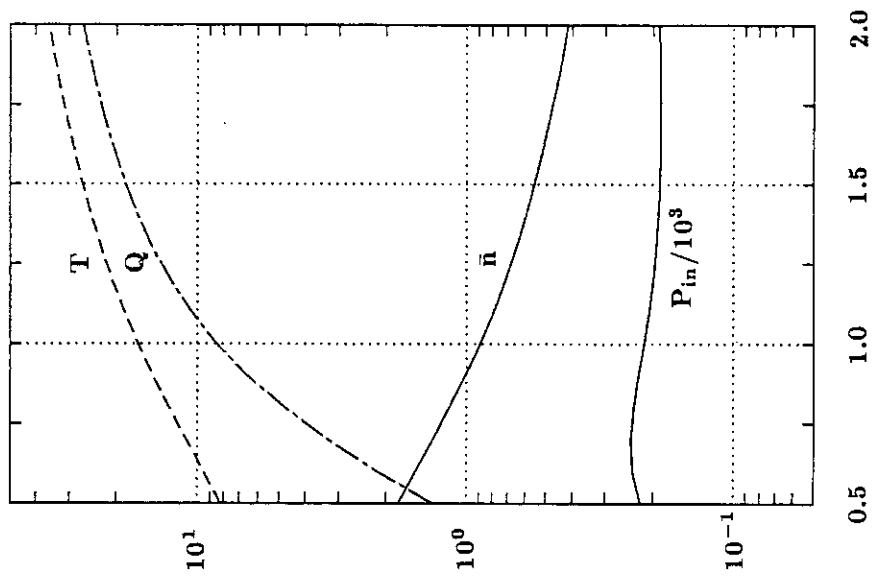


図7 P則の場合の最大Q値、 $Q_{max}$  (一点鎖線) の装置サイズ依存性。動作点 (C点近傍) での入力パワー  $P_{in}$  と線平均密度  $\bar{n}$  を実線で、また温度  $T$  を破線で示す。  $R = 5.8 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $a = 2.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $I_p = 20 \text{ } \mu\text{MA}$ 。

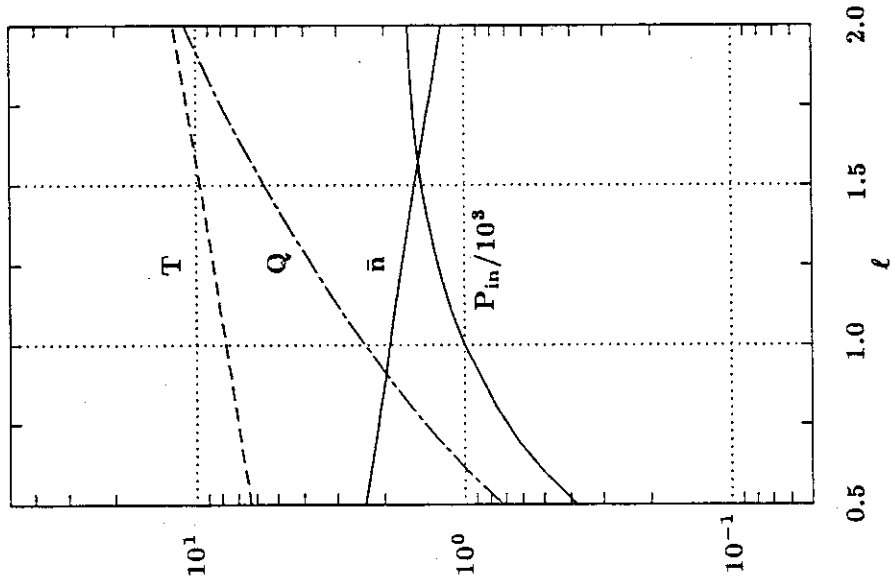


図8 O則の場合の最大Q値、 $Q_{max}$  の装置サイズ依存性。  $R = 5.8 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $a = 2.0 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $I_p = 20 \text{ } \mu\text{MA}$ 。

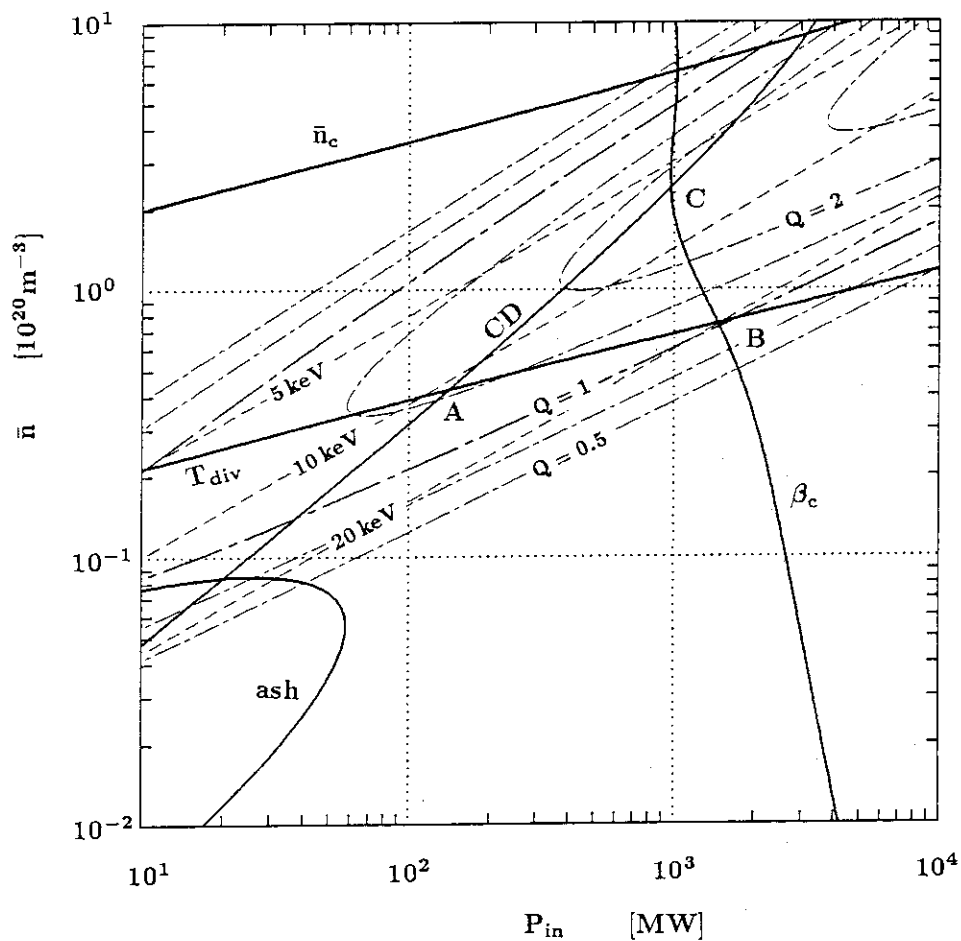


図9 プートストラップ電流を考慮したときの動作特性図（P則）。標準サイズ（ $\ell=1$ ）、 $I_p=20\text{MA}$ 。A点において $P_{\min}=140\text{MW}$ （ $Q=1.5$ ）、ほぼC点において $Q_{\max}=2.4$ （ $P=1\text{GW}$ ）である。

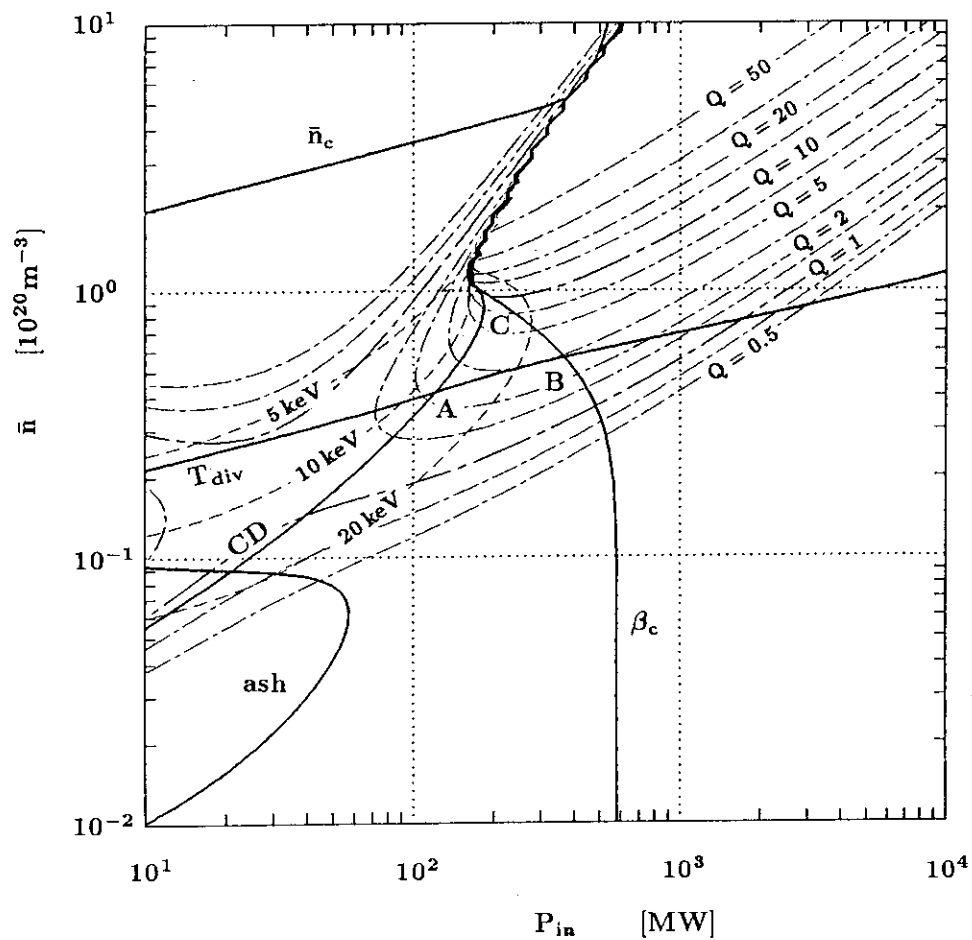


図10 プートストラップ電流を考慮したときの動作特性図 (O則)。標準サイズ ( $\ell=1$ )、 $I_p=20\text{ MA}$ 。A点において  $P_{\text{min}}=120\text{ MW}$  ( $Q=2.2$ )、C点において  $Q_{\text{max}}=11$  ( $P=175\text{ MW}$ ) である。

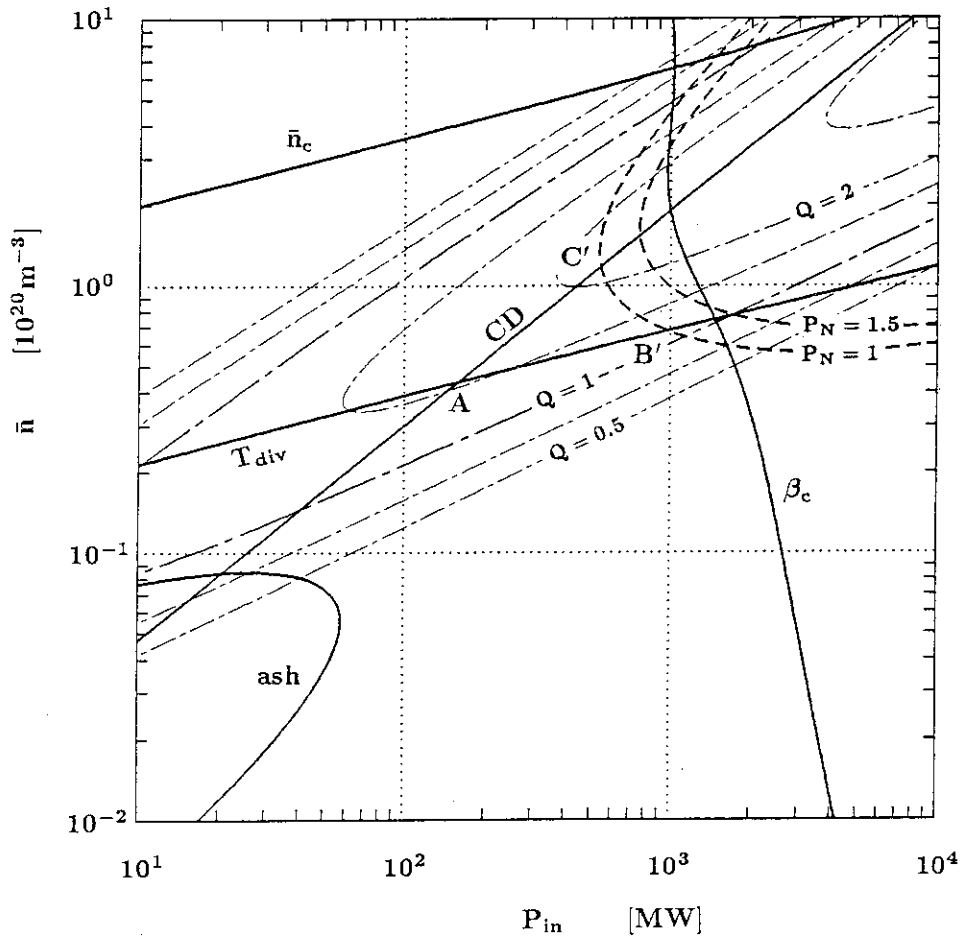


図11 中性子壁負荷条件を考慮した動作特性図 (P則)。標準サイズ ( $\ell = 1$ )、 $I_p = 20 \text{ MA}$ 。第1図と同じ図であるが、等温度線を消去し、中性子壁負荷  $P_N = 1 \text{ MW/m}^2$  及び  $1.5 \text{ MW/m}^2$  を太破線で示す。(この線の左方が運転可能領域)。可能動作領域  $A B' C'$  が1図に比べ狭くなっている。

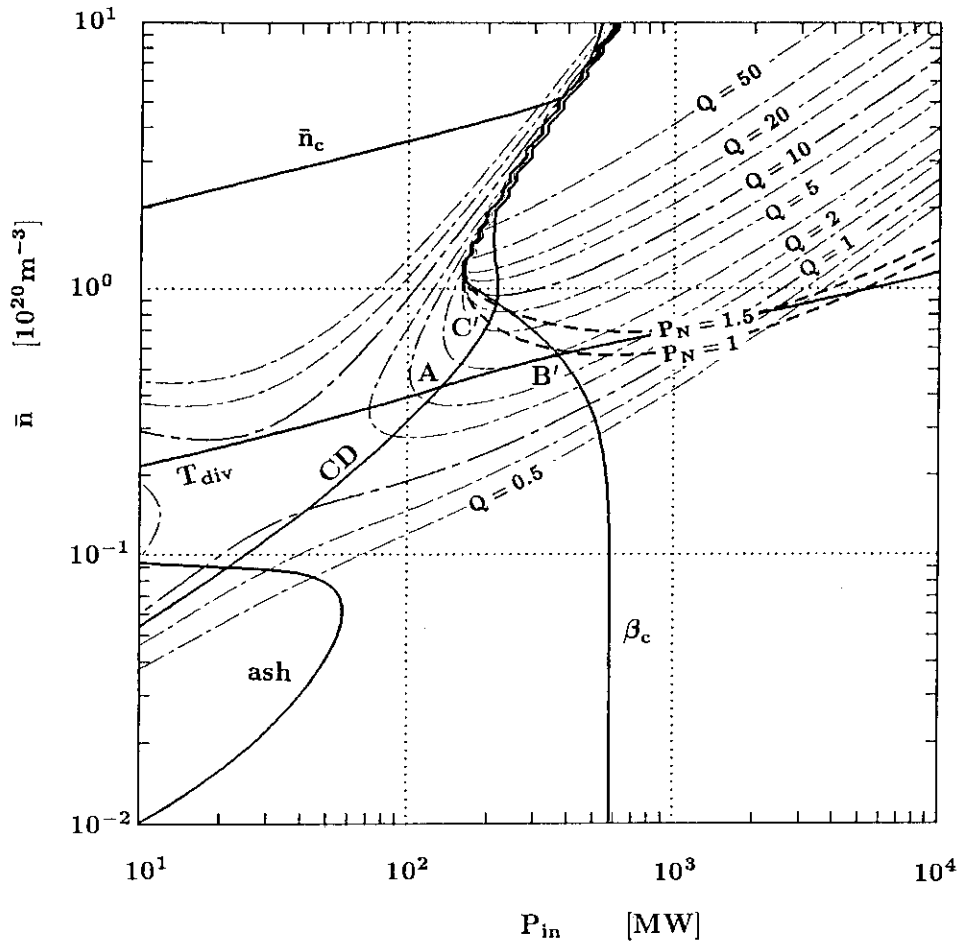


図12 中性子壁負荷条件を考慮した動作特性図（O則）。標準サイズ（ $\ell = 1$ ）、 $I_p = 20 \text{ MA}$ 。中性子壁負荷  $P_N = 1 \text{ MW/m}^2$  及び  $1.5 \text{ MW/m}^2$  を太破線で示す。