

JAERI-M
87-192

JFT-2Mでのダイバータ板の設計と
ダイバータプラズマの測定

1987年10月

| | | | | | | | |
|----|------|----|------|-----|-----|-----|------|
| 柳沢 | 一郎* | 荘司 | 昭朗 | 森 | 雅博 | 小田島 | 和男 |
| 大塚 | 英男 | 鈴木 | 紀男 | 長谷川 | 満** | 太田 | 完治** |
| 杉原 | 正芳 | 上杉 | 喜彦 | 小川 | 俊英 | 小川 | 宏明 |
| 河上 | 知秀 | 川島 | 寿人 | 河西 | 敏 | 仙石 | 盛夫 |
| 玉井 | 広史 | 中沢 | 一郎** | 星野 | 克道 | 松田 | 俊明 |
| 松本 | 宏 | 的場 | 徹 | 三浦 | 幸俊 | 山内 | 俊彦 |
| 一木 | 繁久** | | | | | | |

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。
入手の問い合わせは、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）
あて、お申しこしてください。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）で複写による実費頒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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

| | |
|-------|------------|
| 編集兼発行 | 日本原子力研究所 |
| 印刷 | 日立高速印刷株式会社 |

JFT-2Mでのダイバータ板の設計とダイバータプラズマの測定

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

柳沢 一郎*・莊司 昭朗・森 雅博・小田島和男
大塚 英男・鈴木 紀男・長谷川 満**・太田 完治**
杉原 正芳+・上杉 喜彦・小川 俊英・小川 宏明
河上 知秀・川島 寿人・河西 敏・仙石 盛夫
玉井 広史・中沢 一郎**・星野 克道・松田 俊明
松本 宏・的場 徹+・三浦 幸俊・山内 俊彦
一木 繁久**

(1987年10月20日受理)

JFT-2M小型ダイバータのダイバータ板の設計, ダイバータプラズマのシミュレーションおよび実験を行い以下の結果を得た。1) ダイバータ板材としてのグラファイトの選択と設計の妥当性を確認した。2) NBI加熱時にHモードが実現出来, 比較的低温・高密度のダイバータプラズマが得られた。3) シミュレーションによるとこの時の値は低リサイクリングから高リサイクリングに移行する中間領域に対応する。

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ 臨界プラズマ研究部

* 外来研究員；三菱原子力工業（株）

** 外来研究員；三菱電機（株）

Design of Divertor Plate and Measurements of Double-null
Open Divertor Plasma in the JFT-2M Tokamak

Ichiro YANAGISAWA^{*}, Teruaki SHOJI, Masahiro MORI, Kazuo ODAJIMA
Hideo OHTSUKA, Norio SUZUKI, Mitsuru HASEGAWA^{**}, Kanji OHTA^{**}
Masayoshi SUGIHARA⁺, Yoshihiko UESUGI, Toshihide OGAWA
Hiroaki OGAWA, Tomohide KAWAKAMI, Hisato KAWASHIMA
Satoshi KASAI, Seio SENGOKU, Hiroshi TAMAI, Ichiro NAKAZAWA^{**}
Katsumichi HOSHINO, Toshiaki MATSUDA, Hiroshi MATSUMOTO
Tohru MATOBA⁺, Yukitoshi MIURA, Toshihiko YAMAUCHI
and Shigehisa HITOKI

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

(Received October 20, 1987)

The Design of the divertor plate, the results of the computational simulation and the experimental results on the compact diverter of the JFT-2 tokamak are described. Graphite divertor plates have showed a good performance as divertor target materials through divertor discharges. The H-mode plasma and low temperature, high density divertor plasma are obtained. From computational results, this is in the intermediate region between low and high recycling region.

Keywords: Tokamak, JFT-2M, Open Divertor, Divertor Plate, H-mode,
High Recycling, Languir Probe

* On leave from Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

** On leave from Mitsubishi Electric Co.

+ Department of Large Tokamak Research

目 次

| | | |
|-----|--------------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | ダイバータ板の設計と製作 | 2 |
| 2.1 | 基本構造 | 2 |
| 2.2 | 熱的検討 | 3 |
| 3 | ダイバータプラズマのシミュレーション | 9 |
| 3.1 | 解析条件 | 9 |
| 3.2 | 解析結果 | 9 |
| 3.3 | ま と め | 10 |
| 4 | ダイバータプラズマの測定 | 13 |
| 4.1 | JFT-2Mでのダイバータ配位 | 13 |
| 4.2 | 測定結果 | 13 |
| 5 | 結 論 | 20 |
| | 謝 辞 | 20 |
| | 参考文献 | 21 |

Contents

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Design and Construction of Divertor Plate | 2 |
| 2.1 | Basic Structure | 2 |
| 2.2 | Consideration of Thermal Load | 3 |
| 3 | Simulation of Divertor Plasma | 9 |
| 3.1 | Conditions of Analysis | 9 |
| 3.2 | Results of Analysis | 9 |
| 3.3 | Summary | 10 |
| 4 | Measurements of Divertor Plasma | 13 |
| 4.1 | Divertor Configuration of JFT-2M | 13 |
| 4.2 | Results of Measurements | 13 |
| 5 | Conclusions | 20 |
| | Acknowledgements | 20 |
| | References | 21 |

1. はじめに

ポロイダルダイバータはトカマク炉の熱・粒子の排気手段として、最も有望と考えられているが、最終的に成立するためには、以下の問題を解決してゆかねばならない。

- (1) 主プラズマへの不純物流入の低減
- (2) ダイバータ板の熱負荷及びスパッタリングによるエロージョンの軽減
- (3) ヘリウム排気の実現性
- (4) 主プラズマの閉込め性能を劣化させないこと (Hモード)
- (5) ダイバータ構造の簡素化

これまで、これらの課題を解決するために多くの実験がなされてきた。(1)については、ジュール加熱の実験がDIVA [1], ASDEX [2], ダブルレットIII [3], PDX [4]において、加熱時の実験がASDEX [5] 等においてなされ、その有効性が示されてきた。(2)については、ジュール加熱およびNBI加熱時 (Lモード) の実験がASDEX [6,8], ダブルレットIII [3,7,9] 等でなされ、ダイバータ領域での高リサイクリングとリモートクーリングによる低温、高密度のダイバータプラズマが観測されており、この問題に対する有効性が示されている。また、(3)についても、ダブルレットIII [7] において解決できる可能性が示されている。

1982年ASDEX [10] のダイバータ運転において、加熱入力を増加しても主プラズマの閉込め性能が劣化しないモード (Hモード; 上記(4)に対応) が発見されて以来、一層ポロイダルダイバータの研究に対する気運が高まってきた。Hモード時のダイバータプラズマの特性が、ASDEX [11], ダブルレットIII [12,13], PDX [14] 等でなされHモード時にも(2)の要求を満たすようなダイバータプラズマが得られている。

(5)の要求は、トカマク炉の設計全体にかかわる問題である。トカマク実用炉では、プラズマとトロイダルコイルの間にブランケットや遮蔽が必要となり、主プラズマから隔離されたダイバータ室を設けることは、他機器の設計に大きな影響を与えることになる。また、ダイバータコイルをトロイダルコイルの外側に配置することになると、ダイバータ配位の制御が難しくなることや、ダイバータ板の交換の必要性などを考えると、ダイバータ構造の簡素化は重要な問題である。

JFT-2Mトカマク [15,16] のダイバータ構造は、主プラズマから隔離されたダイバータ室を持たない、オープンダイバータと呼ばれるものである。また、ポロイダルコイル配置も簡素であり、ASDEX (クローズドダイバータ) やダブルレットIII (オープンダイバータ) にくらべ単純な構造に特徴があり、より実用炉に類似した体系を持っていると言えよう。また、ダイバータ・スロート長 (ヌル点からダイバータ板までの距離) は、約8 cm (プラズマ半径の1/4程度) とASDEXやダブルレットIIIの約40 cm (プラズマ半径程度) に比べて非常に短くなっている。このため、JFT-2Mトカマクのダイバータプラズマ特性を研究することは、ポロイダルダイバータの有効性の実証のために重要である。

JFT-2Mトカマクでは、1984年3月にダイバータ実験を行うために必要なダイバータ

板の据付けを完了し、1985年より、本格的なダイバータ放電を開始した。

本報告書では、ダイバータ板の設計、オープンダイバータ特性に関するシミュレーション結果、ならびに1985年度に行なったダブルヌル配位でのジュール加熱時およびNBI加熱（Hモード）におけるダイバータプラズマの測定結果について述べる。

2. ダイバータ板の設計と製作

ダイバータ放電を行なうにあたっては、真空容器と真空容器内部品（磁気プローブ等）を防護するために、ダイバータ板を取付ける必要があった。ここでは、ダイバータ板の構造、設計条件について述べる。

2.1 基本構造

第2.1図に、真空容器内に据付けられたダイバータ板を示す。

ダイバータ板の材質は、耐熱衝撃性と軽元素材であることを考慮して、グラファイト（東洋カーボン社製 AX650-Kの高純度処理品）とした。第2.1表にグラファイトの物性値を示す。

第2.1表 ダイバータ板の物性値

| | | |
|--------|-------|--------------------|
| 材 質： | 高純度炭素 | （東洋カーボン AX-650-K） |
| 比 重： | 1.8 | g/cm ³ |
| 熱伝導率： | 100 | Kcal/mh°C |
| 曲げ強さ： | 5.0 | Kg/mm ² |
| 灰 分： | 20 | ppm |
| 異 方 性： | 1.1 | （max） |
| 粒 子 径： | 25 | μm |

グラファイトブロックの形状と取付け構造を第2.2図に、ポロイダル断面での配置と、平面配置図をそれぞれ第2.3図、第2.4図に示す。

グラファイトブロックは、ステンレス製の固定用ホルダーを介して真空容器内壁に溶接された台座に取付ける構造としている。空間的余裕のない、分割部と絶縁部では、グラファイトを直接ボルトで締込む構造としたが、その他の領域では、グラファイトブロックは、ステンレス棒をブロック中に通し、そのステンレス棒を介して止める構造とした。この構造は、プラズマから直接ボルトを見込まず、金属不純物の発生の可能性を減らすと共に、グラファイトのボルト穴での熱問題を緩和するメリットを持っている。

板の据付けを完了し、1985年より、本格的なダイバータ放電を開始した。

本報告書では、ダイバータ板の設計、オープンダイバータ特性に関するシミュレーション結果、ならびに1985年度に行なったダブルヌル配位でのジュール加熱時およびNBI加熱（Hモード）におけるダイバータプラズマの測定結果について述べる。

2. ダイバータ板の設計と製作

ダイバータ放電を行なうにあたっては、真空容器と真空容器内部品（磁気プローブ等）を防護するために、ダイバータ板を取付ける必要があった。ここでは、ダイバータ板の構造、設計条件について述べる。

2.1 基本構造

第2.1図に、真空容器内に据付けられたダイバータ板を示す。

ダイバータ板の材質は、耐熱衝撃性と軽元素材であることを考慮して、グラファイト（東洋カーボン社製 AX650-Kの高純度処理品）とした。第2.1表にグラファイトの物性値を示す。

第2.1表 ダイバータ板の物性値

| | | |
|--------|-------|--------------------|
| 材 質： | 高純度炭素 | （東洋カーボン AX-650-K） |
| 比 重： | 1.8 | g/cm ³ |
| 熱伝導率： | 100 | Kcal/mh°C |
| 曲げ強さ： | 5.0 | Kg/mm ² |
| 灰 分： | 20 | ppm |
| 異 方 性： | 1.1 | （max） |
| 粒 子 径： | 25 | μm |

グラファイトブロックの形状と取付け構造を第2.2図に、ポロイダル断面での配置と、平面配置図をそれぞれ第2.3図、第2.4図に示す。

グラファイトブロックは、ステンレス製の固定用ホルダーを介して真空容器内壁に溶接された台座に取付ける構造としている。空間的余裕のない、分割部と絶縁部では、グラファイトを直接ボルトで締込む構造としたが、その他の領域では、グラファイトブロックは、ステンレス棒をブロック中に通し、そのステンレス棒を介して止める構造とした。この構造は、プラズマから直接ボルトを見込まず、金属不純物の発生の可能性を減らすと共に、グラファイトのボルト穴での熱問題を緩和するメリットを持っている。

ダイバータ板の基本的な設計方針は以下の通りである。

- (1) 真空容器への取付けは、真空容器内壁の既設の台座を使用する。
- (2) 真空容器内部品、計測用ポートとの干渉を避ける形状、配置とする。特に、上下の大口径ポート（垂直ポート）との干渉を避けるために、トロイダル方向に第 2.4 図に示すような、不連続な構造とした。また、第 2.3 図に示すように、ダイバータ板の取付け位置が真空容器の肩部になるため、ポロイダル方向に 5 分割すると共に、製作上のメリットを考慮して、(A)と(B)及び(C)と(D)のブロックは対称な形状とした。ダイバータ板は第 2.4 図に示すようにトロイダル方向の 18ヶ所の位置に、上下合せて計 180 個設置した。
- (3) ダイバータ板には、真空内部品を保護するだけの高さが必要であるが、一方、プラズマ容積をかせぎ、ヌル点とダイバータ板の距離を充分にとるためには、できるだけ低くする必要がある。これらの観点から、真空容器内壁からの最大高さを 85 mm とした。
- (4) アクティブな冷却は行わず、グラファイトの冷却はふく射と真空容器への熱伝導により行う。さらに、熱容量を稼ぎ 1 ショットでのバルクの温度上昇を低く抑える。また、表面熱負荷の軽減のために、傾斜部を設ける。

2.2 熱的検討

ダイバータ板への熱負荷条件は、

- (1) JFT-2Mでの最大加熱パワーが

| | |
|--------|----------------|
| ジュール加熱 | 1 MW x 0.5 sec |
| NBI加熱 | 2 MW x 0.2 sec |
| ICRF加熱 | 4 MW x 0.3 sec |

であることから、プラズマへの最大加熱入力を矩形波換算で 6 MW x 0.3 sec とする。

- (2) そのうち、50%が主プラズマでのラディエーションで失われ、残り50%がダイバータ板への入熱となるとする、
- (3) 内側セパトリクスと外側セパトリクスへの入熱比を 1 : 4 とする。
- (4) ダイバータ部でのスクレエプオフの巾を ~ 3 cm とする、

の仮定から、トロイダル円環面上での最大熱負荷として $0.5 \text{ kW/cm}^2 \times 0.3 \text{ sec}$ を設定した。

ダイバータ板への表面熱流束は、磁力線とダイバータ板とのなす角度に依存する。

ダイバータ板は、垂直ポートとの干渉を避けるためにトロイダル方向に不連続な構造とせざるを得ないが、この時、端部の熱入力を軽減するため第 2.2 図に示したような傾斜を持たせることとした。

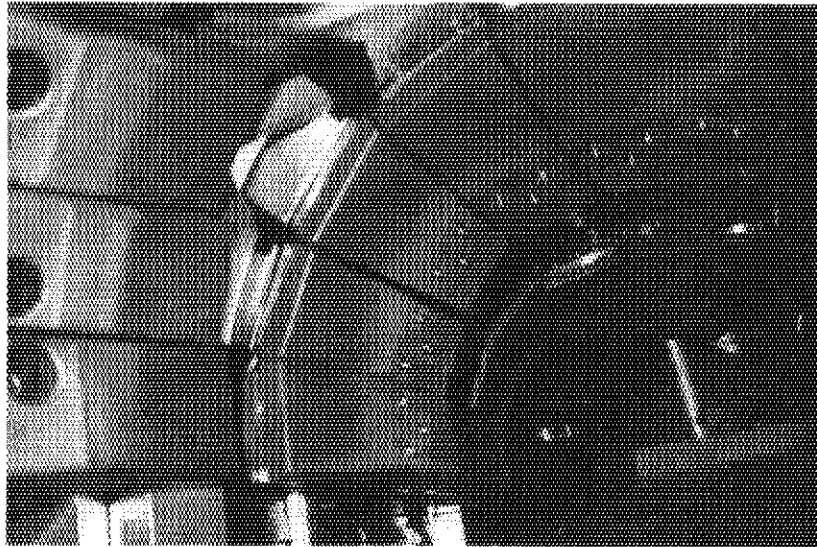
傾斜部への表面熱流束、傾斜の度合いと磁力線の角度に依存し、次式で求められる。

$$q = (\alpha + \beta) q_0 / (\beta \sqrt{1 + \alpha^2})$$

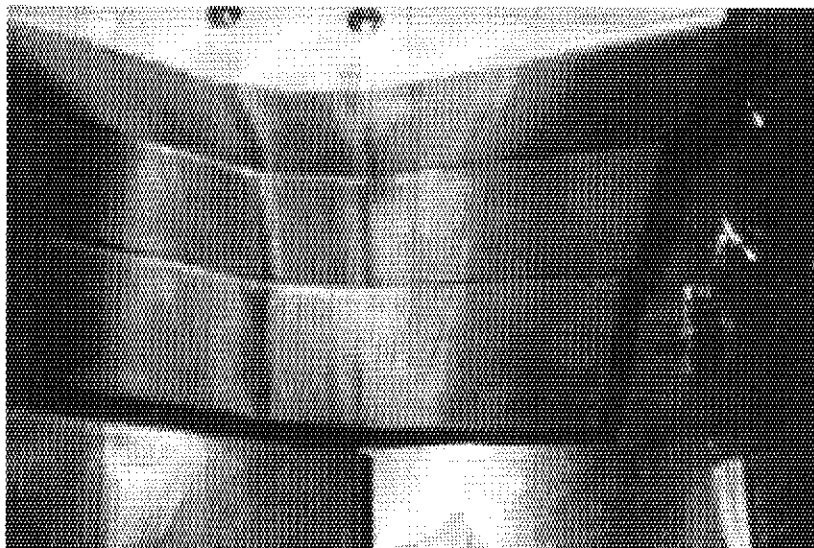
ここで、 q_0 は平坦部への表面熱流束 (0.5 kW/cm^2)、 $\alpha = h/l$ 、 $\beta = B_p/B_t$ 、また、 h, l は傾斜部の高ささと長さ、 B_p, B_t はダイバータ板でのポロイダル磁場とトロイダル磁場である。第 2.5 図に示すように q は、 α の増大、 β の減少とともに増加する。 α の値は、ダイバータ板

間にトロイダル方向のギャップがあるため、あまり大きくはとれない。ここでは、ダイバータ部の β を $1/15$ と想定し、両隣りのダイバータ板との位置関係から、入熱が傾斜部より下側（真空容器側）へ及ばないように、 $\alpha = 0.25$ を設計目標とした。

この時の傾斜部への入熱は $2.3 \text{ kW/cm}^2 \times 0.3 \text{ sec}$ となり、表面温度上昇は約 $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ と推定される。また、1ショット当りのバルクの温度上昇は約 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ である。これらの値は、設計上特に問題にならない値である。

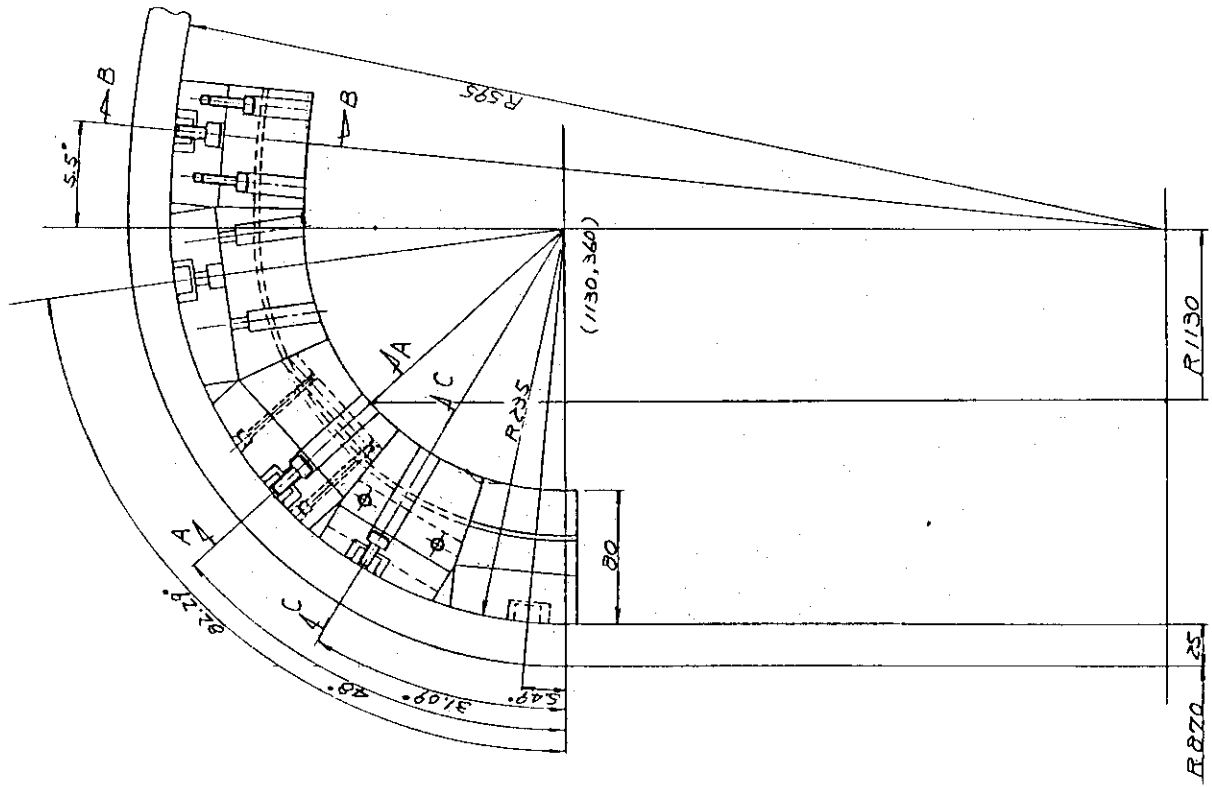


(a)

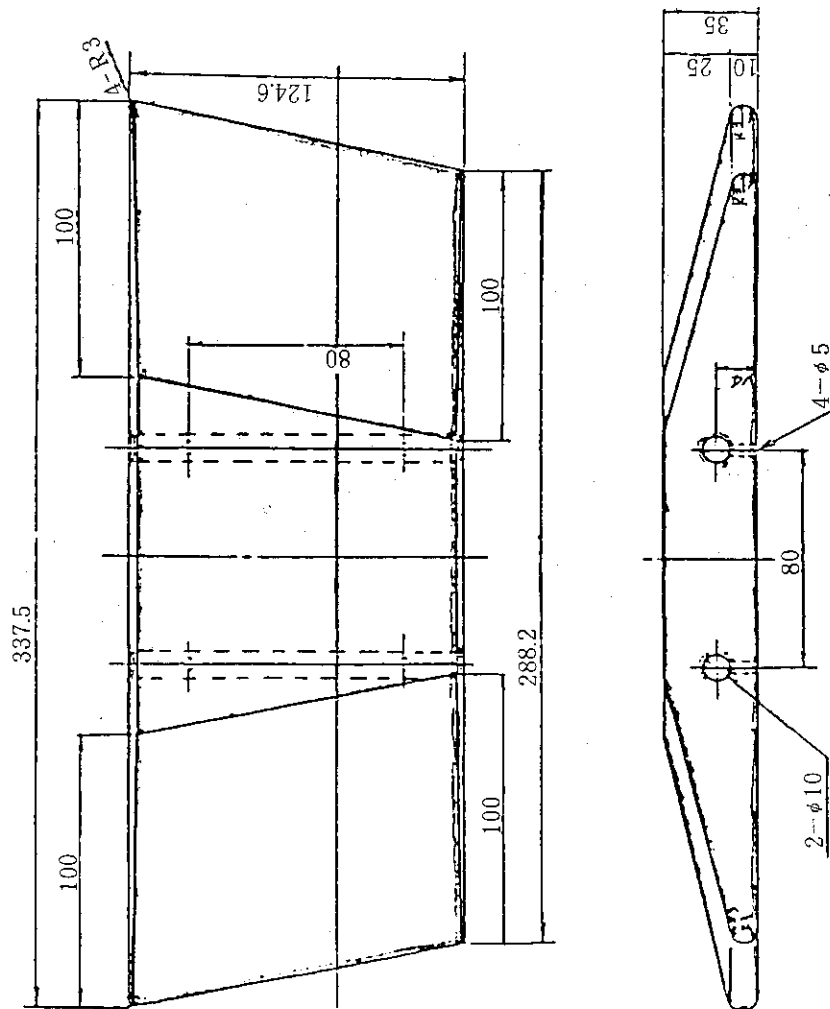


(b)

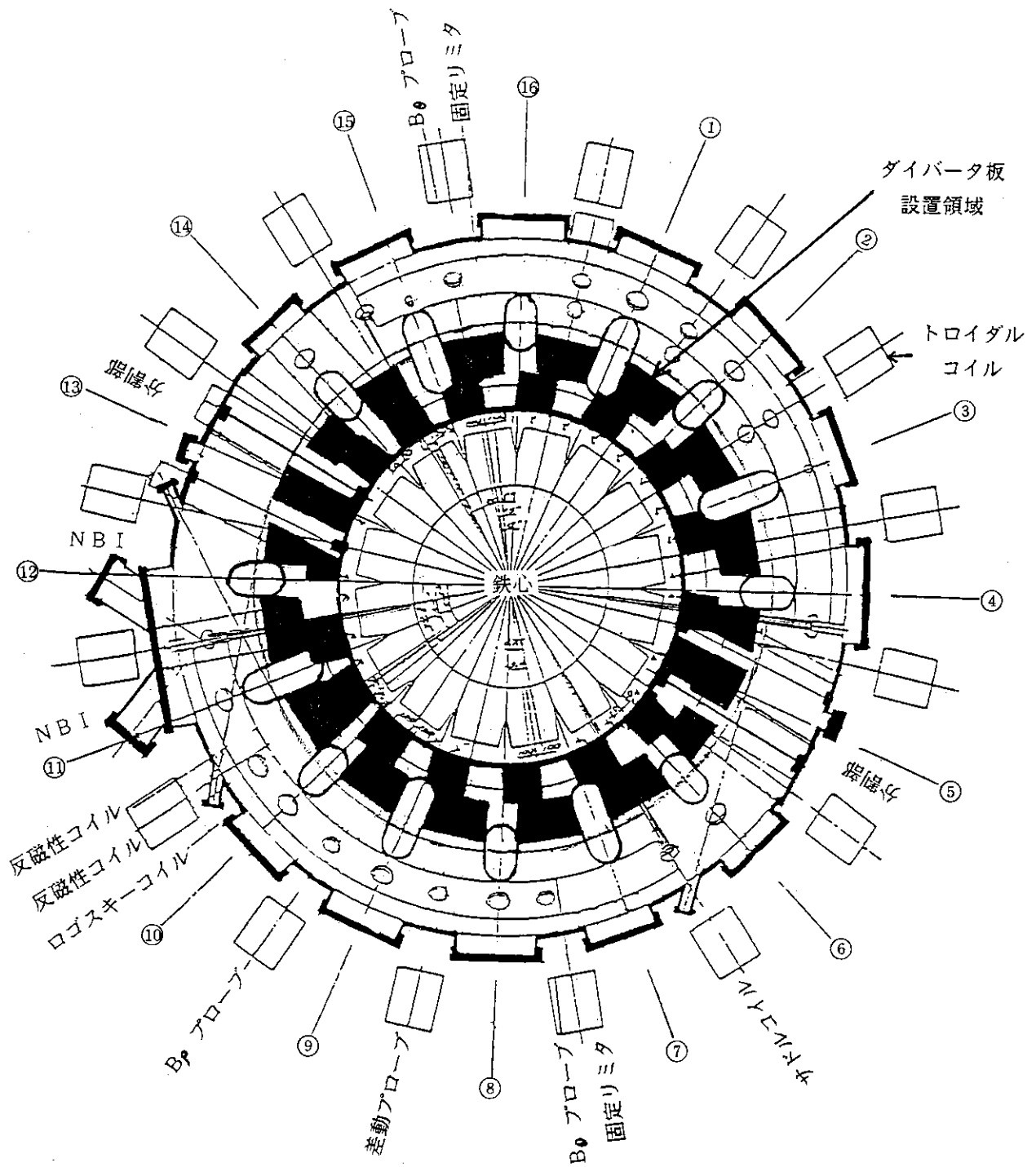
第 2.1 図 真空容器内に据付けられたダイバータ板
(a) 横方向からの写真
(b) 前側からの写真



第 2.3 図 ダイバータ板のポロイダル方向設置位置



第 2.2 図 JFT-2M のダイバータ板の構造



第 2.4 図 ダイバータ板のトロイダル方向設置位置

表面熱流束

$$q = (\alpha + \beta) \cdot q_0 / (\beta \cdot \sqrt{1 + \alpha^2})$$

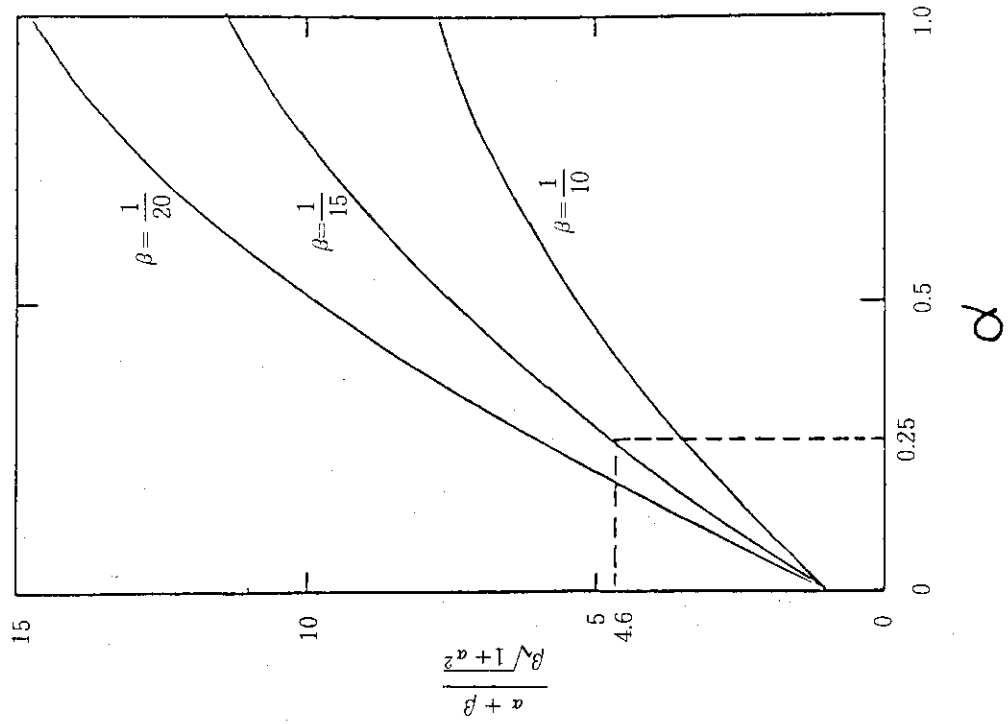
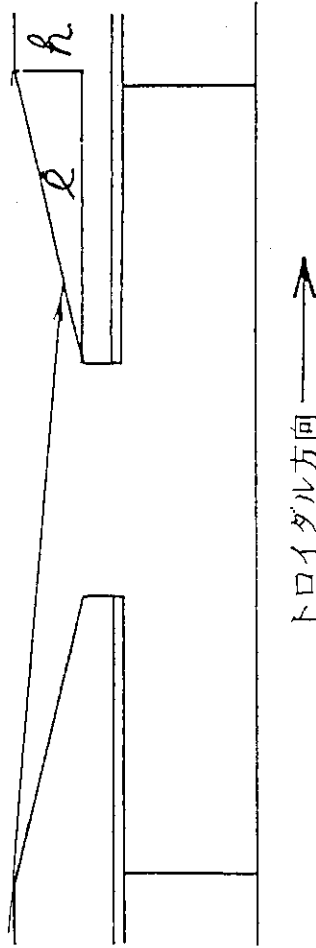
ここに、 $\alpha = h/l = 0.25$

$$\beta = Bp/Bt = 1/15$$

=>

最大熱流束 = 2.3 kW/cm x 0.3 sec

表面温度上昇 ~ 1700 °C



第 2.5 図 ダイバーター板の形状と表面熱流束の関係

3. ダイバータプラズマのシミュレーション

3.1 解析条件

D I C O Nコードは、ダイバータプラズマを1次元の流体モデルとして扱い、中性粒子の挙動を2次元モンテカルロ計算により評価するものである。〔18〕

ここでは、第3.1図に示すように、スロート入口からダイバータ板までの領域を扱った計算を行った。計算モデルを第3.2図に示す。J F T - 2 Mでのダイバータ配位でのスロート長は、ダブルヌル配位の場合に、10cm程度が限度と考えられる。このため、計算モデルでのスロート長は10cm (Case-1)、5cm (Case-3)の2ケースとした。また、中性粒子仕切板の効果を見るため、スロート長10cmの場合について、スロート入口をしぼったモデル (Case-2) の評価も行った。

スロート入口での粒子束、熱流束の設定は以下の通りである。

熱流束： $Q_{total}(l=0) = 1 \text{ MW}$ (固定)

粒子束： $I_{total}(l=0)$ パラメータ

分 布： $Q_0 \text{Exp}(-x/\Delta Q)$

$I_0 \text{Exp}(-x/\Delta I)$

ここに、

l はヌル点から磁場に沿っての距離、

x はヌル点を通る磁力線から磁場に垂直方向の距離、

を仮定し、減衰係数をそれぞれ

$$\Delta Q 1 = 2 \text{ cm}$$

$$\Delta Q 2 = 1 \text{ cm}$$

$$\Delta I 1 = 4 \text{ cm}$$

$$\Delta I 2 = 2 \text{ cm}$$

とする。ここで、添字は1がセパトロリクスの外側、2がセパトロリクスの内側を意味する。(図3.2を参照のこと)

3.2 解析結果

第3.3図に、スロート入口での流子束とダイバータ板での電子密度 n_{ed} 、電子温度 T_{ed} の関係を示す。粒子束を増大すると、 n_{ed} は増大し、 T_{ed} は減少する。Case-1の場合、粒子束が 1×10^{22} (1/sec) 越えると n_{ed} が非線形的に増大し始め、それに伴い電子温度も低下する。粒子束が 2×10^{22} /sec あたりから n_{ed} の増加は緩和し始める。この時 $n_{ed} \sim 1 \times 10^{14}$ /cm³、 $T_{ed} \sim 10 \text{ eV}$ である。

一方、スロート長が5cmと短いCase-3では、 n_{ed} のビルドアップの開始がより粒子束の大きな領域にシフトしており、Case-1に比べ同じ粒子束で電子温度が高く、電子密度が低い。

Case - 3 では、逆により少ない粒子束でビルドアップが始まっており、ダイバータ部からの中性粒子の逆流をおこりにくくする事により、高リサイクリングの系が容易に実現される事をしめしている。

第 3.4 図に、Case - 1 の体系で、熱流束が 1 MW の場合と 0.5 MW の場合の比較を示す。高リサイクリングの領域では、入熱量の違いは実現される Ted に影響を与えず、むしろ ned に影響を与えている。

J F T - 2 M のプラズマパラメータを

平均電子密度 n_e : $5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$

プラズマ体積 : 2.5 m^3

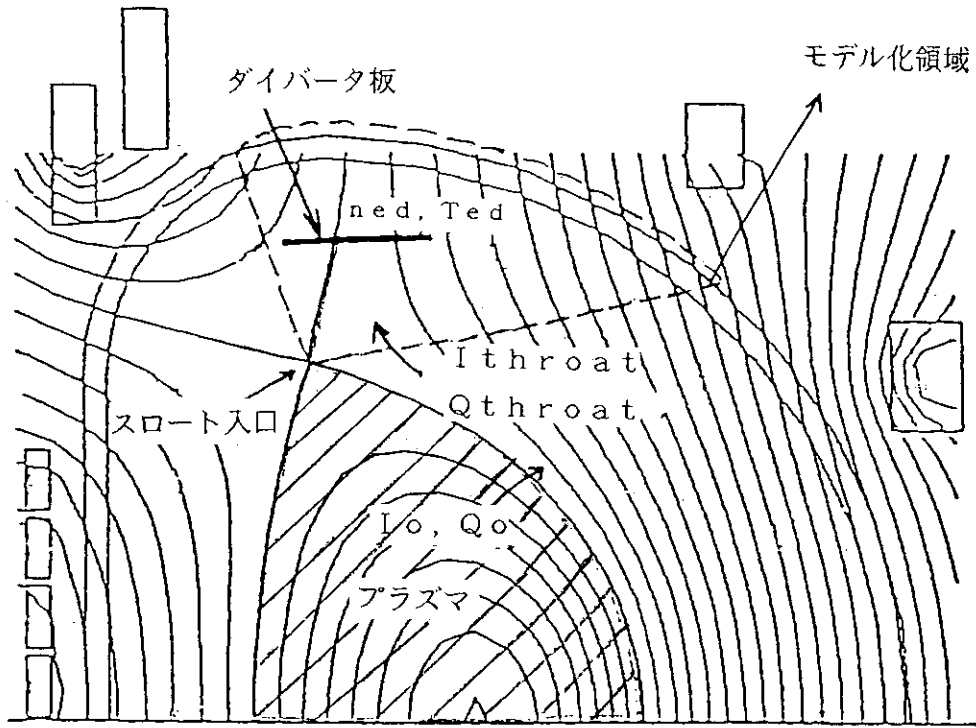
粒子閉込め時間 τ_p : 10 msec

と仮定すると、主プラズマからの流出フラックスは、 $1.25 \times 10^{22} / \text{sec}$ となる。ダブルヌルダイバータの場合には、1 つのセパトリスへの粒子束は、主プラズマ周辺のスクレープオフ層でのリサイクリングを無視すると、この半分以下の値になると考えられる。シミュレーションの結果によれば、高リサイクリングの領域に到達するためには、スロート長 10 cm の場合にも $\sim 1.5 \times 10^{22} / \text{sec}$ 程度以上の全粒子束が必要であり、J F T - 2 M のダイバータで高リサイクリングのダイバータプラズマを実現するのは難かしいかもしれない。

3.3 ま と め

シミュレーションの結果をまとめると次のようになる。

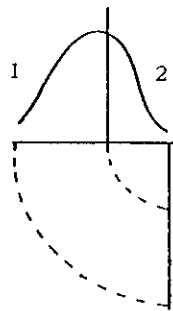
- (1) J F T - 2 M のダイバータのスロート長を 10 cm とすると、高リサイクリング領域のダイバータプラズマを実現するには、スロート入口で $\sim 1.5 \times 10^{22} / \text{sec}$ 以上の粒子束が必要。
J F T - 2 M のプラズマパラメータから考えるとこの領域へ到達するのは難しいかもしれない。
- (2) 高リサイクリング領域に到達するのに必要な粒子束、スロート長とスロート入口部の中性粒子のコンダクタンスに依存し、スロート長を大きくし、スロート入口のコンダクタンスをしばれば小さな値となる。
- (3) 高リサイクリング領域では、粒子束一定の場合には、入熱量を増大させることは、Ted を変えずに ned を増大させることになる。



第 3.1 図 ダイバータプラズマのシュミレーションを行ったモデル化領域

$$Q(x) = Q_0 \text{Exp}(-x/\Delta Q)$$

$$I(x) = I_0 \text{Exp}(-x/\Delta I)$$



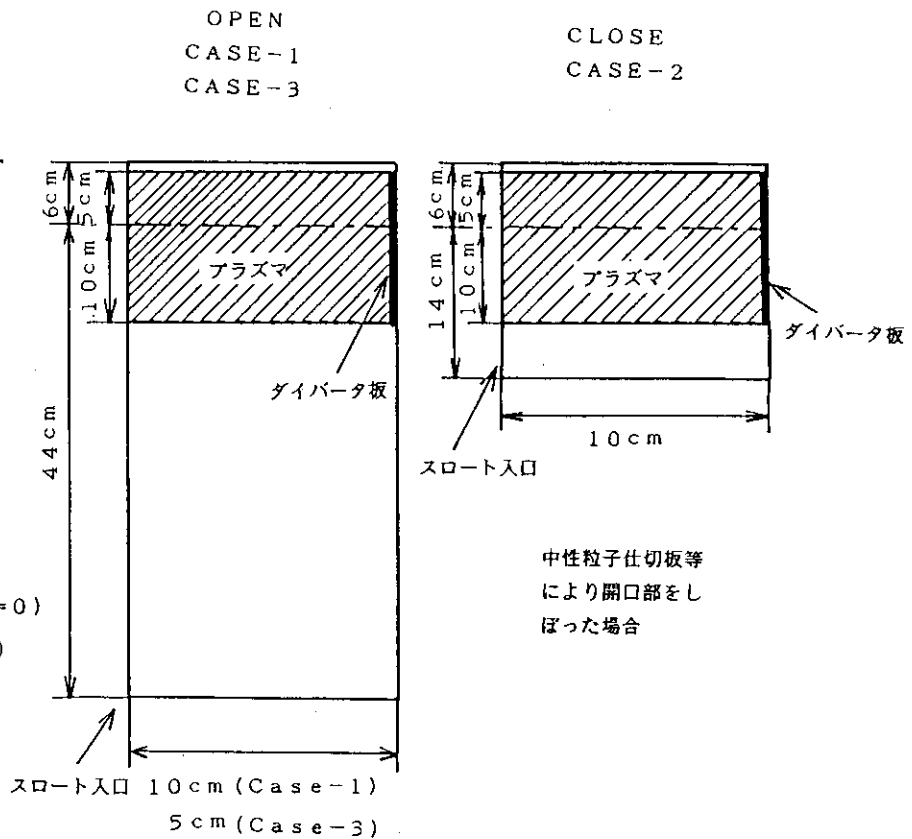
$$\Delta Q1 = 2 \text{ cm}$$

$$\Delta Q2 = 1 \text{ cm}$$

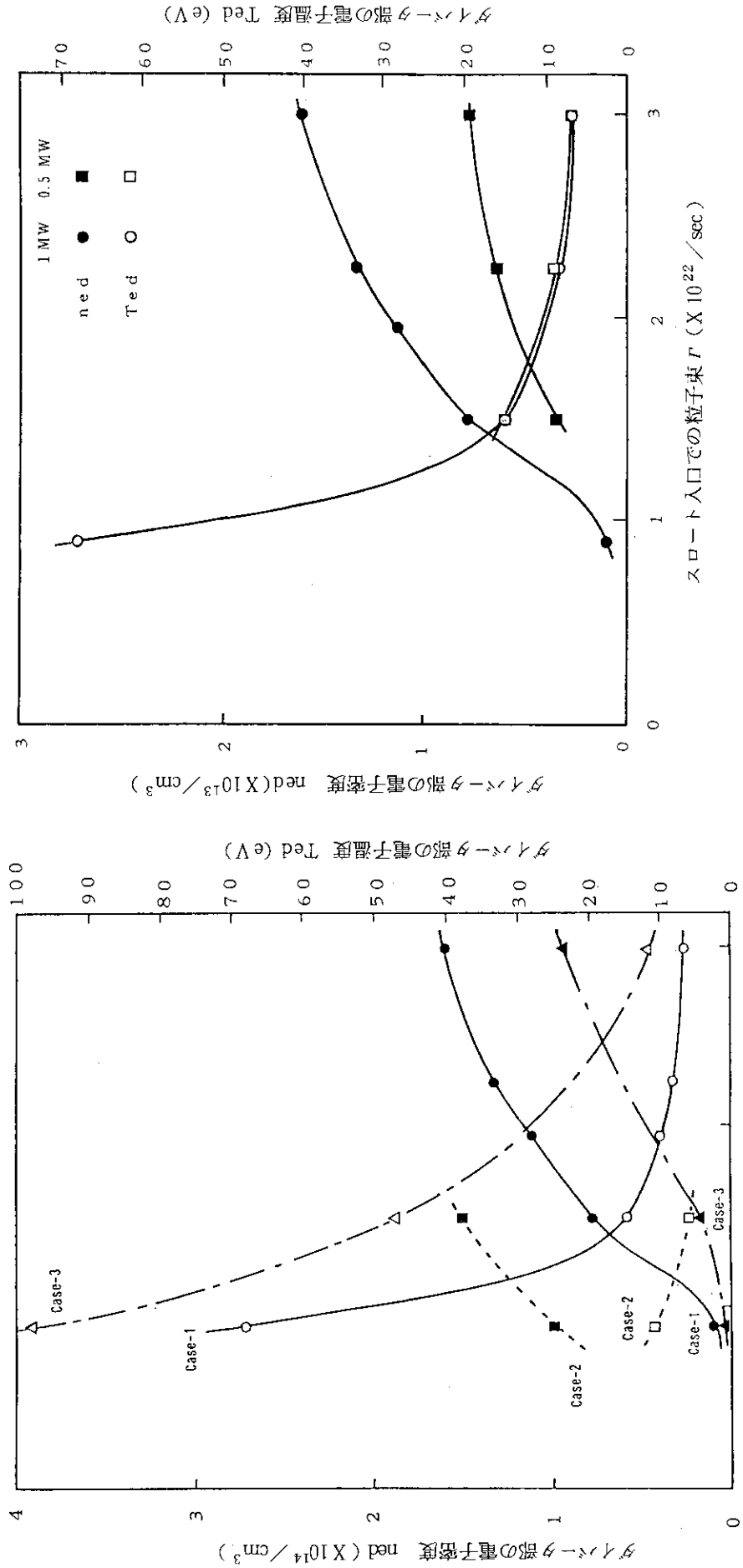
$$\Delta I1 = 4 \text{ cm}$$

$$\Delta I2 = 2 \text{ cm}$$

熱流束: $Q_{total}(l=0)$
= 1MW (固定)



第 3.2 図 ダイバータプラズマのシュミレーションを行った計算モデル



第 3.4 図 Case-1 での熱流束の違いによる差, 入熱量の違いは Ted よりも ned に影響する。

第 3.3 図 スロート入口での粒子束とダイバータ板での電子密度 ned, 電子温度 Ted (Case-1~3)

4. ダイバータプラズマの測定

JFT-2Mでは、1985年6月よりNBI加熱伴った本格的なダイバータ実験が開始された。ここでは、ダイバータ実験の初期に行われた、ダブルヌル配位での静電プローブによるダイバータプラズマの測定結果について述べる

4.1 JFT-2Mでのダイバータ配位

第4.1図に、JFT-2Mでのダブルヌル・ダイバータ配位を示す。ヌル点とダイバータ板の距離は最大で約8cmである。これ以上、ヌル点を深くすることは、上下位置制御が困難になり、現状の制御系では不可能である。静電プローブは、上側のダイバータ板上に、17本がポロイダルコイル方向に設置されている。

4.2 測定結果

4.2.1 ジュール加熱時

ジュール加熱時のダイバータプラズマのピーク電子温度 T_{ed} 、電子密度 n_{ed} と主プラズマの平均電子密度 n_e の関係を第4.2図に示す。 n_e の増大に伴い、 T_{ed} は $\sim 40\text{eV}$ ($n_e \sim 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$) から数eV ($n_e > 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$) へと、ほぼ直線的に減少する。一方、 n_{ed} に関しては、 $1 \times 10^{13} < 3 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ の範囲で、 $5 \times 10^{12} < n_{ed} < 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ の値となっており、 n_e の増大にともない増大する傾向はあるが、 T_{ed} に比べてその依存性は小さい。

ジュール加熱時のラディエーションによる損失は、第4.3図に示すように低密度領域 ($n_e \sim 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$) で加熱入力50%程度、高密度領域 ($n_e \sim 2.8 \times 10^{13}/\text{cm}^3$) で加熱入力80%程度になっている。したがって、ジュール加熱時における T_{ed} 、 n_{ed} と n_e の関係は、主に n_e の増大に伴う主プラズマからのラディエーションの増加によるダイバータへの入熱量の減少によるものと考えられる。この密度領域では、主プラズマでの粒子閉込め時間 τ_p が n_e に比例すると考えられるので、ダイバータ部への主プラズマからの粒子束は一定と見なせる。それ故、 n_{ed} の n_e への依存性が弱いことは、ダイバータでのリサイクリングによるフラックス増倍があまり顕著でないことを示すものと考えられる。また、不純物はリミター運転に較べ酸素、鉄等が半減した。〔17〕

4.2.2 NBI加熱時

第4.4図にNBI加熱時の T_{ed} 、 n_{ed} のピーク値と n_e の関係を示す。これは、 $I_p = 215\text{kA}$ 、 $B_t = 1.2\text{T}$ での放電での結果で、図中に同条件でのジュール加熱時の測定結果も含めて示してある。NBI加熱時のデータはH-mode遷移時のものである。

NBI加熱時には、 n_e の上昇により T_{ed} の減少と n_{ed} の増大がみられ、特に n_{ed} の n_e 依存性

はジュール加熱時に比べはっきりしている。加熱入力 1.3MW で $n_e \sim 6 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ の時にピーク値が $T_{ed} \sim 10 \text{ eV}$, $n_{ed} \sim 3 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ の比較的、低温、高密度のダイバータプラズマが得られた。前章でのシミュレーションの結果と比較すると、この値は低リサイクリングから高リサイクリングに移行する中間領域に相当する。また、ダイバータプラズマの磁力線に垂直方向 (x) の電子温度および密度の分布の半値幅は約 3 ~ 4 cm であった。

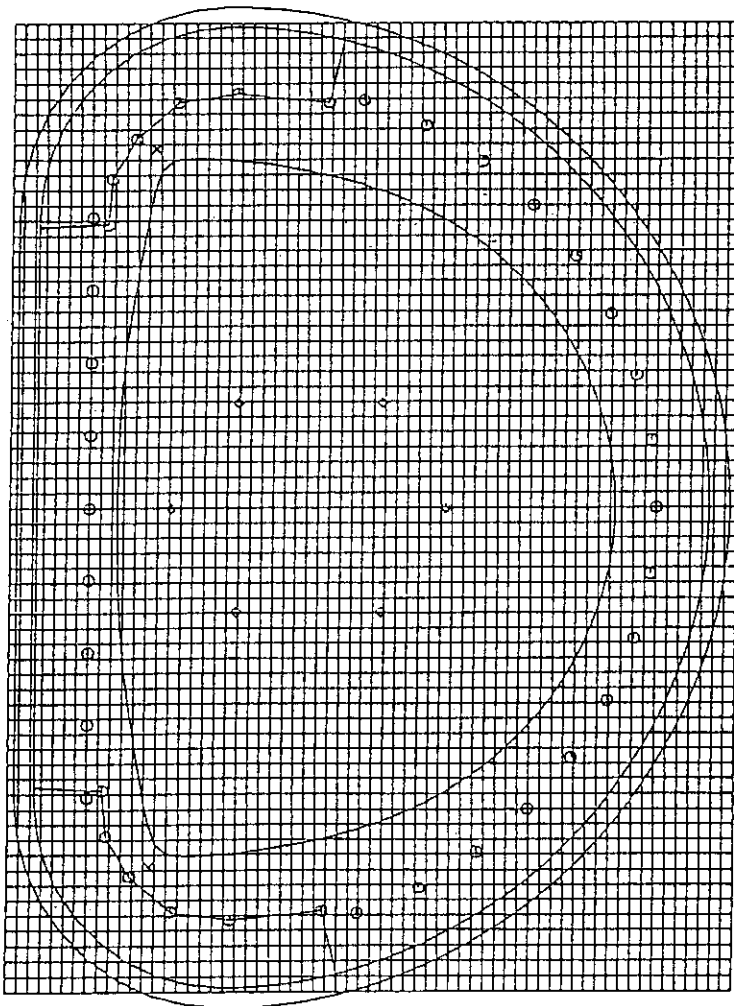
4.2.3 ダイバータ部での熱流束

第 4.5 図に、ジュール加熱時のイオン飽和電流 j_s と電子温度 T_{ed} の積のピーク値と n_e の関係を示す。ダイバータへの熱流束 P_{cc} が

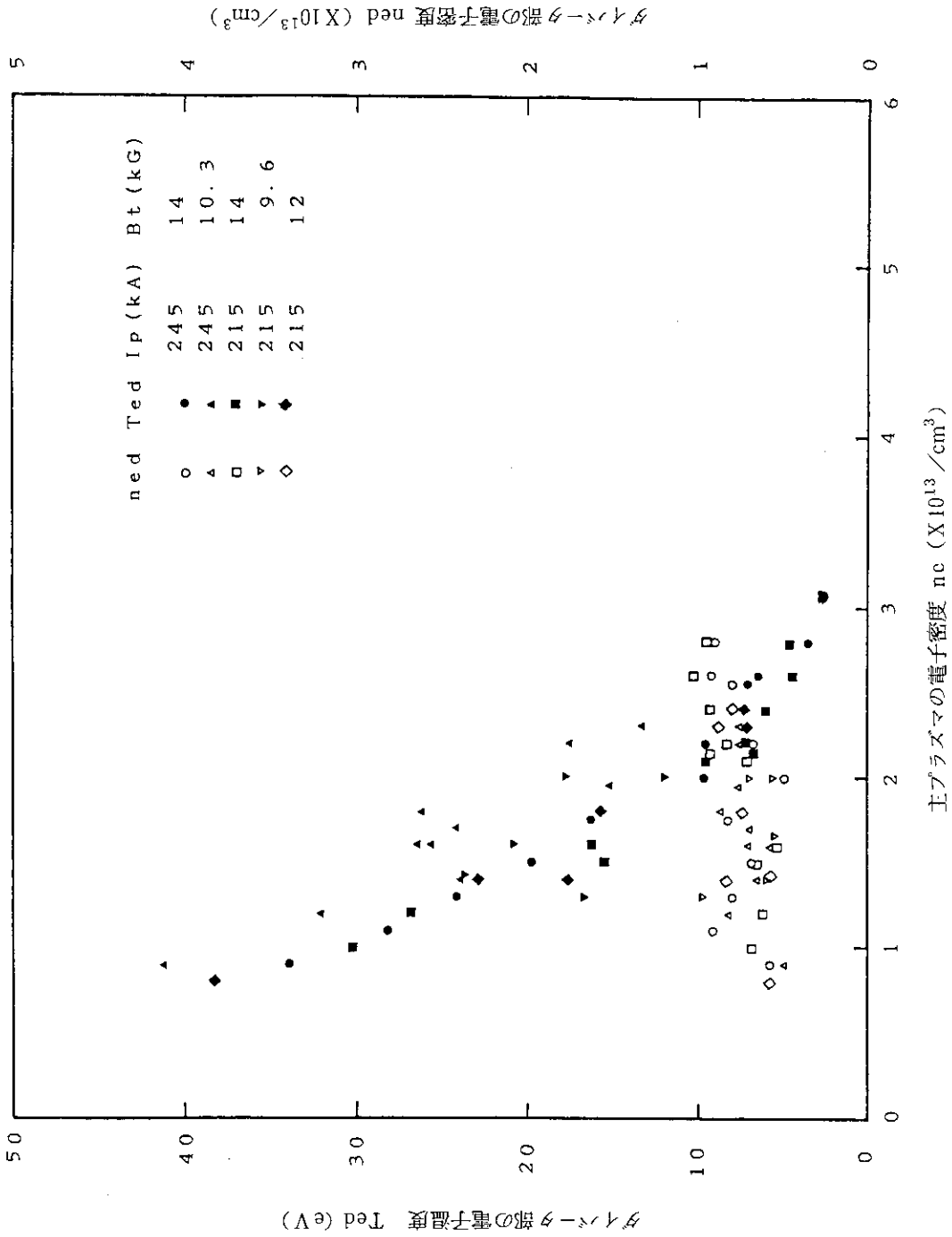
$$P_{cc} = 8 j_s \cdot T_e$$

で評価されるとすると、ジュール加熱時のダイバータ部での磁力線方向の最大熱流束は、 $n_e \sim 1 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ で約 $1 \text{ kW} / \text{cm}^2$ となり、 n_e の上昇に伴い急激に減少し、 $n_e \sim 3 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ で約 $0.1 \text{ kW} / \text{cm}^2$ となる。

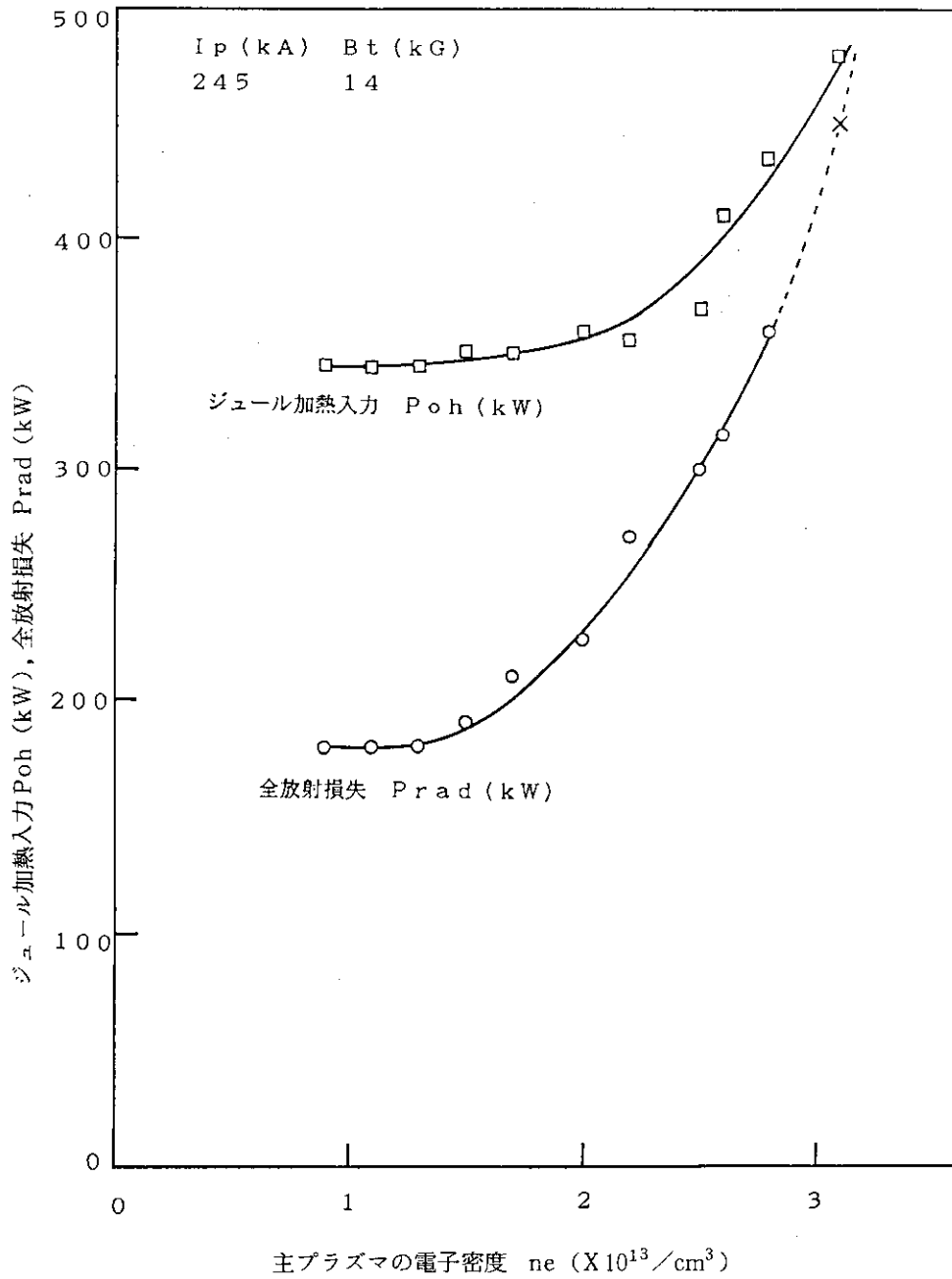
NBI 加熱時における磁力線方向への最大熱流束は、第 4.6 図に示す $j_s \cdot T_e$ と n_e の関係から、 $2.5 \text{ kW} / \text{cm}^2 \sim 0.25 \text{ kW} / \text{cm}^2$ の範囲にあると推定される。



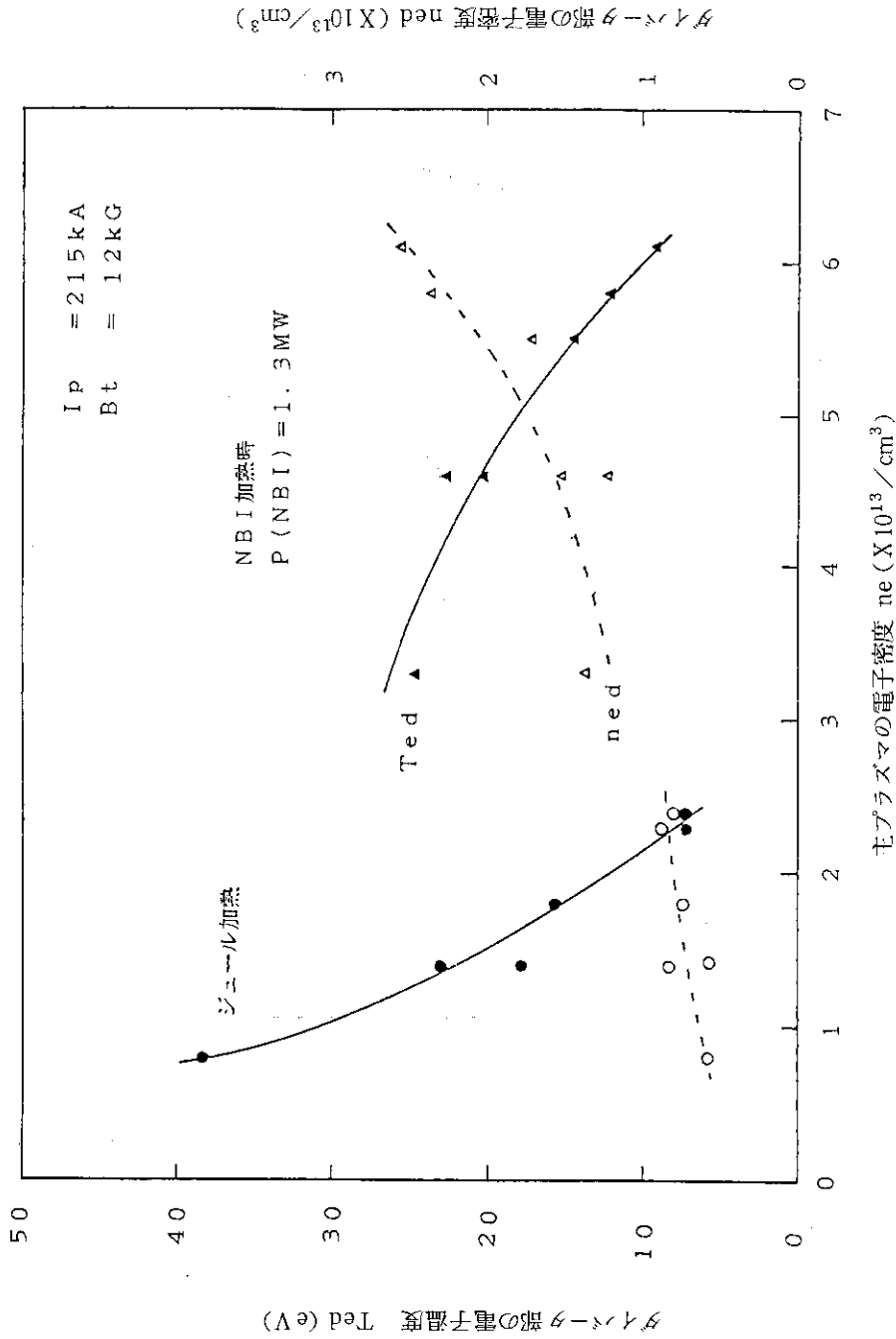
第 4.1 図 JFT-2M のダブルヌル・オープンダイバータ配位例



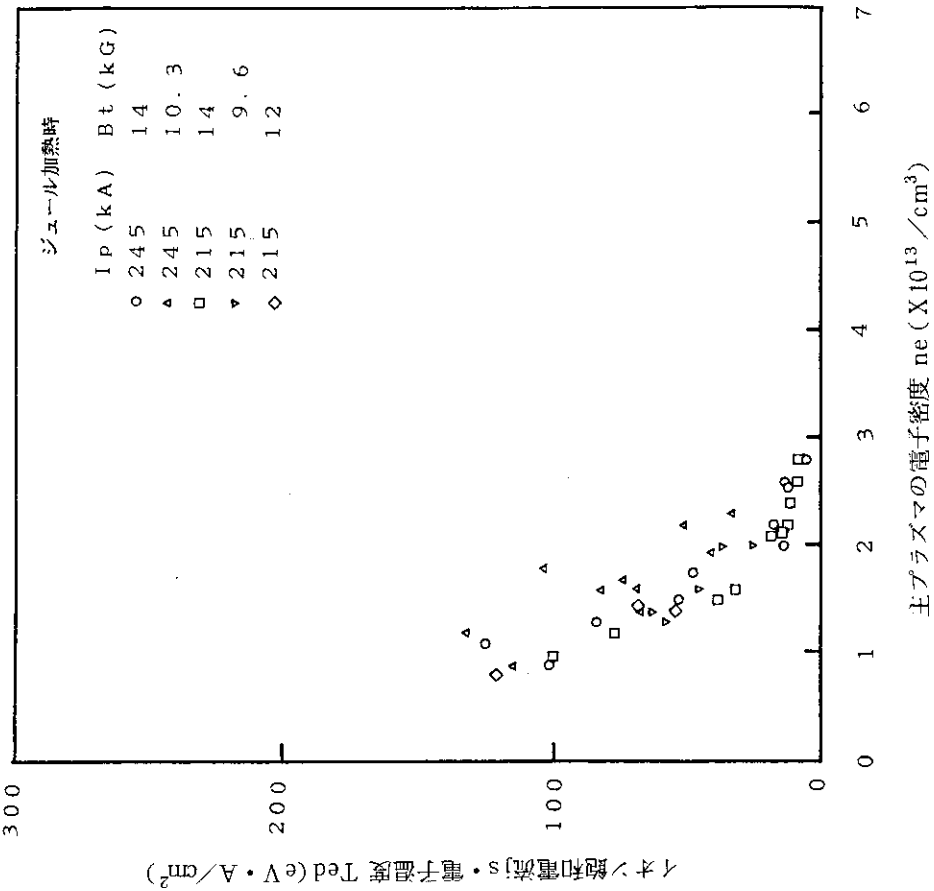
第 4.2 図 ジュール加熱時のダイバータプラズマの電子密度 n_{ed} ,
 電子温度 T_{ed} (各れもピーク値) の主プラズマの
 電子密度 n_c に対する依存性



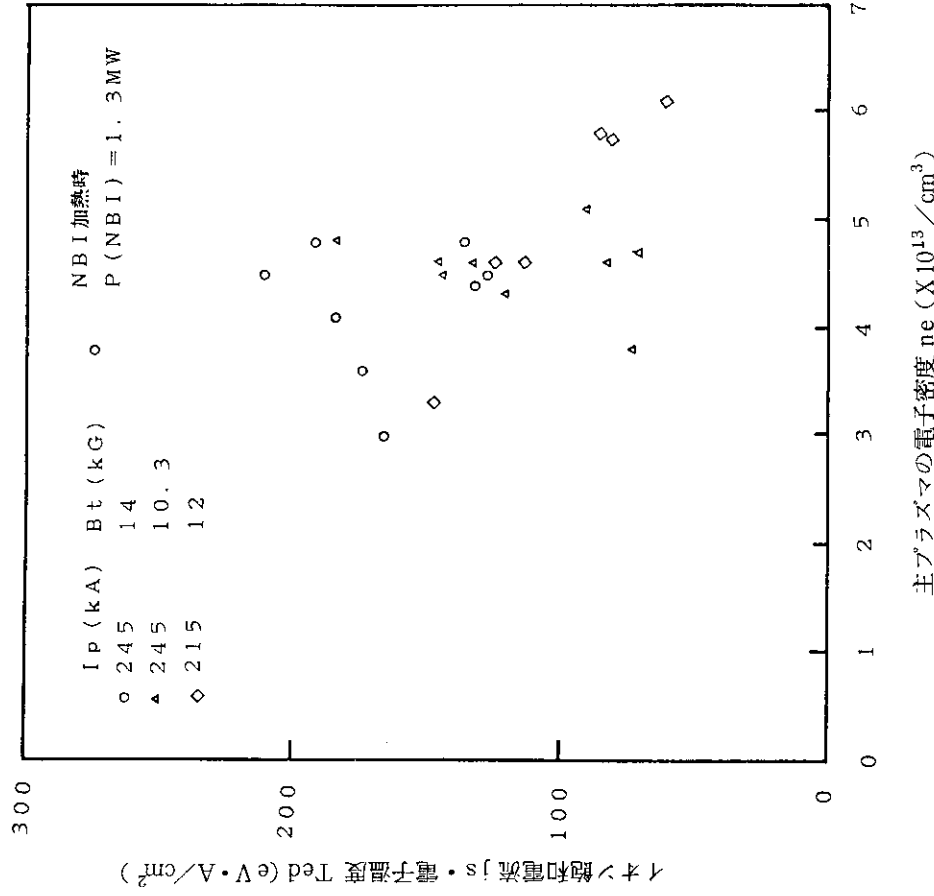
第 4.3 図 ジュール加熱時の加熱入力 P_{oh} と全放射損失 P_{rad} の電子密度 n_e に対する依存性



第4.4図 NBI加熱時のダイバータプラズマの電子密度 n_{ed} 、
 電子温度 T_{ed} (各れもピーク値) の主プラズマの
 電子密度 n_e に対する依存性



第4.5図 ジュール加熱時のイオン飽和電流 j_s と電子温度 T_e の積(～熱流束 P_{cc})の電子密度 n_e に対する依存性



第4.6図 NBI加熱時のイオン飽和電流 j_s と電子温度 T_e の積(～熱流束 P_{cc})の電子密度 n_e に対する依存性

5. 結 論

JFT-2M小型ダイバータのダイバータ板の設計、ダイバータプラズマのシミュレーションおよび実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) JFT-2Mトカマクでは、1984年3月に、ダイバータ実験を行うために、ダイバータ板を設置した。ダイバータ板の材質は、Low-Z材であることと、ダイバータプラズマからの高熱負荷を考慮して、グラファイトを選定した。1987年9月までの実験で、グラファイトブロックにクラック等は発生せず、良好な使用実績を示している。
- (2) ダイバータ実験に先立ち、JFT-2Mのオープンダイバータでのダイバータプラズマ特性をDICONコードを用いて評価した。その結果から、スロート長が10cmの場合に高リサイクリング領域のダイバータプラズマを実現するためには、スロート入口で $\sim 1.5 \times 10^{22}/\text{sec}$ (熱流束1MWの場合)以上の粒子束が必要であることが分った。
- (3) ダブルヌル配位でのダイバータプラズマの温度、密度を測定し、JFT-2Mのオープンダイバータの以下のような基本特性を明らかにした。
 - a) ジュール加熱時には、ダイバータプラズマのピーク温度 T_{ed} は n_e の増大に伴い、約40eV ($n_e \sim 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$)から数eV ($n_e \geq 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$)へと減少する。一方、ピーク密度は、 $5 \times 10^{12} < n_{ed} < 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ の値となり、 n_e への依存性は小さい。また、不純物(酸素、鉄等)はリミター運転に較べ半減出来た。
 - b) NBI加熱時($\sim 1.3 \text{ MW}$)には、 n_e の増大に伴い、 T_{ed} の減少と n_{ed} の増大が見られ、特に n_{ed} の n_e 依存性はジュール加熱時に比べはっきりしている。スロート長が $\sim 8 \text{ cm}$ と短くかつオープン形状のダイバータでHモードが実現出来、 $n_e \sim 6 \times 10^{13}$ の時、 $n_{ed} \sim 3 \times 10^{13}$ 、 $T_{ed} \sim 10 \text{ eV}$ の比較的低温、高密度のダイバータ特性がえられた。この値は、低サイクリングから高リサイクリングに移行する中間領域に対応している。
 - c) イオン飽和電流から推定されるダイバータ部での磁力線方向の熱流束は、ジュール加熱時、NBI加熱時とも n_e の増大に伴い減少する。その値はジュール加熱時において $1 \sim 0.1 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 、加熱入力1.3MWのNBI加熱時において $2.5 \sim 0.25 \text{ kW}/\text{cm}^2$ である。

謝 辞

本研究を遂行するに当り、常に暖かい御支援および御指導をいただいたプラズマ実験研究室前田彦祐室長、臨界プラズマ計測開発室船橋昭昌室長、核融合研究部田中裕二次長、田中正俊部長、那珂研究所苦米地頭所長および森茂副理事長に深く感謝の意を表します。また、実験にあたって御協力いただいた装置技術管理室の各氏および実験に先立ち多くの御助言をいただいた臨界プラズマ実験室下村安夫室長をはじめとする核融合研究部、臨界プラズマ研究部の方々に感謝いたします。

5. 結 論

JFT-2M小型ダイバータのダイバータ板の設計、ダイバータプラズマのシミュレーションおよび実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) JFT-2Mトカマクでは、1984年3月に、ダイバータ実験を行うために、ダイバータ板を設置した。ダイバータ板の材質は、Low-Z材であることと、ダイバータプラズマからの高熱負荷を考慮して、グラファイトを選定した。1987年9月までの実験で、グラファイトブロックにクラック等は発生せず、良好な使用実績を示している。
- (2) ダイバータ実験に先立ち、JFT-2Mのオープンダイバータでのダイバータプラズマ特性をDICONコードを用いて評価した。その結果から、スロート長が10cmの場合に高リサイクリング領域のダイバータプラズマを実現するためには、スロート入口で $\sim 1.5 \times 10^{22}/\text{sec}$ (熱流束1MWの場合)以上の粒子束が必要であることが分った。
- (3) ダブルヌル配位でのダイバータプラズマの温度、密度を測定し、JFT-2Mのオープンダイバータの以下のような基本特性を明らかにした。
 - a) ジュール加熱時には、ダイバータプラズマのピーク温度 T_{ed} は n_e の増大に伴い、約40eV ($n_e \sim 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$)から数eV ($n_e \geq 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$)へと減少する。一方、ピーク密度は、 $5 \times 10^{12} < n_{ed} < 1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ の値となり、 n_e への依存性は小さい。また、不純物(酸素、鉄等)はリミター運転に較べ半減出来た。
 - b) NBI加熱時($\sim 1.3 \text{ MW}$)には、 n_e の増大に伴い、 T_{ed} の減少と n_{ed} の増大が見られ、特に n_{ed} の n_e 依存性はジュール加熱時に比べはっきりしている。スロート長が $\sim 8 \text{ cm}$ と短くかつオープン形状のダイバータでHモードが実現出来、 $n_e \sim 6 \times 10^{13}$ の時、 $n_{ed} \sim 3 \times 10^{13}$ 、 $T_{ed} \sim 10 \text{ eV}$ の比較的低温、高密度のダイバータ特性がえられた。この値は、低サイクリングから高リサイクリングに移行する中間領域に対応している。
 - c) イオン飽和電流から推定されるダイバータ部での磁力線方向の熱流束は、ジュール加熱時、NBI加熱時とも n_e の増大に伴い減少する。その値はジュール加熱時において $1 \sim 0.1 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 、加熱入力1.3MWのNBI加熱時において $2.5 \sim 0.25 \text{ kW}/\text{cm}^2$ である。

謝 辞

本研究を遂行するに当り、常に暖かい御支援および御指導をいただいたプラズマ実験研究室前田彦祐室長、臨界プラズマ計測開発室船橋昭昌室長、核融合研究部田中裕二次長、田中正俊部長、那珂研究所苫米地顕所長および森茂副理事長に深く感謝の意を表します。また、実験にあたって御協力いただいた装置技術管理室の各氏および実験に先立ち多くの御助言をいただいた臨界プラズマ実験室下村安夫室長をはじめとする核融合研究部、臨界プラズマ研究部の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] DIVA Group , Nucl.Fusion 18, (1978)1619
- [2] M.Keilhacker et al. , in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research(Proc.8th Int.Conf.Brussels,1980)Vol.2, IAEA, Vienna(1981)351
- [3] M.Nagami et al. , ibid, Vol.2, IAEA, Vienna(1981)1474
- [4] D.Meade et al. , ibid, Vol.1, IAEA, Vienna(1981)665
- [5] M.Keilhacker et al. , in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research(Proc.9th Int.Conf.Baltimore,1982)Vol.3, IAEA, Vienna(1983)183
- [6] ASDEX Team, presented by M.Keilhacker , Proceedings of IAEA Technical Committee Meeting on Divertors and Impurity Control, Garching(1981)23
- [7] M.Shimada et al. , Phys.Rev.Lett. 47(1981)796
- [8] R.E.Muller et al , Nucl.Fusion 22(1982)1651
- [9] S.Sengoku et al. , Nucl.Fusion 24(1984)415
- [10] F.Wagner et al. , Phys.Rev.Lett. 49(1982)1408
- [11] Y.Shimomura et al. , Nucl.Fusion 23(1983)869
- [12] A.Kitsunezaki et al. , in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research(Proc.10th Int.Conf.London,1984)Vol.1, IAEA, Vienna(1985)57
- [13] M.Shimada et al. , ibid, Vol. , IAEA, Vienna(1985)
- [14] D.K.Owens et al. , J.Nucl.Mater. 121(1984)29
- [15] T.Shoji et al. , Proc.of the 11th Europ.Conf.on Controlled Fusion and Plasma Physics(Aachen)1, (1983)5
- [16] K.Odajima et al. , in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research(11th Int.Conf.Kyoto,1986)IAEA-CN-47/A-III-2
- [17] H.Ogawa et al. , to be published
- [18] S.Saito et al., J.Nucl.Mater. 121(1984)199