

JAERI-M
86-022

JT-60における位置不安定性解析

1986年3月

小関 隆久・安積 正史・関 省吾
常松 俊秀・徳田 伸二・滝塚 知典

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

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、お申しこしください。なお、このほかに財團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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

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

JT-60における位置不安定性解析

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

小関隆久・安積正史・関省吾
常松俊秀・⁺徳田伸二・⁺滝塚知典

(1986年1月30日受理)

JT-60のダイバータ配位では、トーラスの外側にX点があり、n-index が $+\infty$ から $-\infty$ まで変化するため、位置安定性（軸対称モード）が問題となる。そこで、線形理想MHD安定性解析コード ERATO-J を用いて、主にダイバータ配位プラズマについて解析した。

解析の結果、次の3点が明らかになった。(1)トーラスの外側にX点を持つダイバータ配位に対しても、リミタ配位同様広い範囲で位置安定性がある。(2)垂直不安定に対する変位は、X点付近で小さく、X点を中心回転する動きを示し、一方、水平不安定に対する変位は、プラズマ表面に局在すると共に、X点に流れ込むパターンを示しており、共に剛体変位から大きくずれる。(3)電流分布がピークした場合、n-index の安定な領域は、nの大きい方へシフトする。ただし、JT-60における標準的なダイバータ放電パラメータ($B_T = 4.5\text{ T}$, $I_P = 2\text{ MA}$, $q_0 > 1$)では、この安定領域のシフトは問題とならない。

Positional Instability Analysis in JT-60

Takahisa OZEKI, Masafumi AZUMI, Shogo SEKI,
Toshihide TSUNEMATSU⁺, Shingi TOKUDA⁺
and Tomonori TAKIZUKA⁺

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

(Received January 30, 1986)

JT-60 has the poloidal divertor with the stagnation point (X-point) in the outerside of torus, where n-index changes from $+\infty$ to $-\infty$. Therefore it is necessary to analyze the positional instability (axisymmetric mode). In this paper divertor configuration is mainly analyzed by using the ideal MHD stability code ERATO-J.

Following results were obtained;

- (1) There is a wide positional stability region in case of divertor configuration with X-point in the outerside of torus.
- (2) In the case of the vertical instability, the displacement is small near the X-point and plasma rotates around the X-point, while, for the horizontal instability the displacement is localized near the plasma surface and the plasma flows into the X-point. Both of these displacement are much different from those of rigid model.
- (3) As the internal inductance increases, the stability region shifts toward the large n-index number. For usual plasma operation with $q_0 > 1$, however, this change of stability region is not essential.

Keywords; Tokamak, JT-60, Positional Instability, Axi-symmetric Mode, n-index, ERATO-J, MHD Stability.

⁺ Department of Thermonuclear Fusion Research

目 次

1. 目的	1
2. 計算の概要 (MHD 平衡計算コード, 安定性解析コード ERATO - J)	4
3. 計算結果	6
3.1 ダイバータ配位における安定領域	6
3.2 剛体変位モデルとの比較	6
3.3 電流分布による位置安定性への影響	7
4. 結論	14
謝辞	17
参考文献	17

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of calculation (MHD equilibrium code, MHD stability analysis code ERATO-J)	4
3. Numerical results	6
3.1 Stability region in divertor configuration	6
3.2 Comparison with rigid displacement model	6
3.3 Effect of current distribution	7
4. Conclusion	14
Acknowledgements	17
References	17

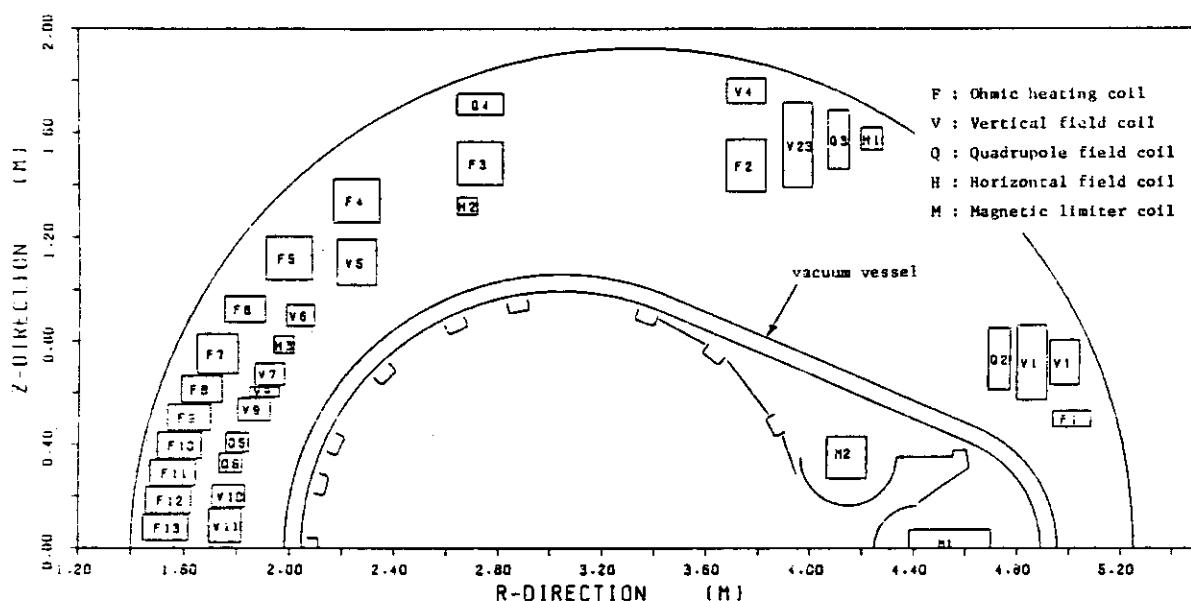
1. 目的

臨界プラズマ実験装置 JT - 6 0 は、ポロイダルダイバータを備えた大型トカマク装置である。ダイバータは、不純物の軽減、エネルギー閉じ込めの改善等の幾つかの効果が期待されている。一方、JT - 6 0 のダイバータは、Stagnation point (X点) をトーラス外側に持っている為、位置安定性（軸対称モードの安定性）が問題となる。本報告では、主に JT - 6 0 におけるダイバータ放電時の位置安定性について述べる。

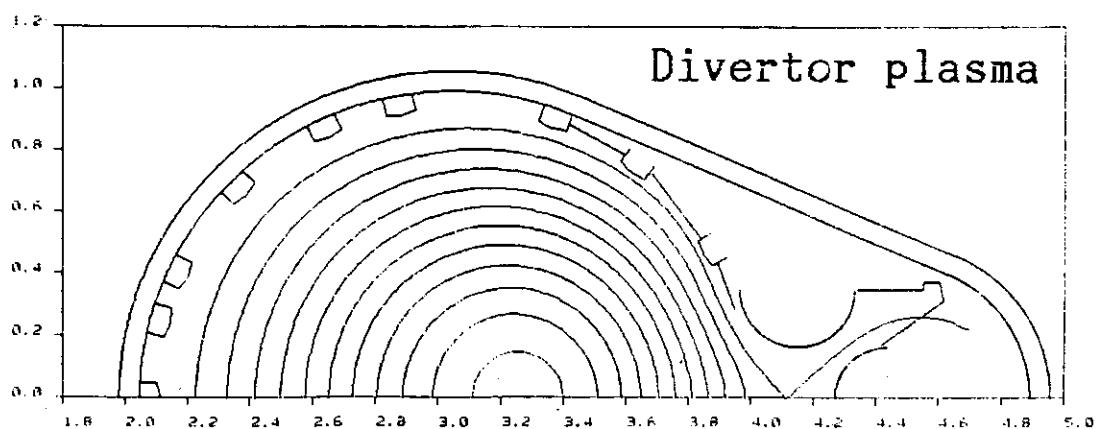
JT - 6 0 では、プラズマの位置断面形状を 5 つのポロイダルコイルで制御している。すなわち、図 1 に示す様に空心変流器コイル (OH コイル)、垂直磁場コイル (V コイル)、水平磁場コイル (H コイル)、四重極磁場コイル (Q コイル)、磁気リミタコイル (M コイル) からなり、M コイルを使用しない固定リミタによる放電と M コイルを使用したダイバータ放電が行なえる。一般にトカマクにおける位置安定性は、 $n\text{-index}$ ($= -\frac{R}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial R}$)⁽¹⁾ で表わされ、 $0 < n < 1.5$ で安定であると言われている。JT - 6 0 のリミタ放電では、Q コイル電流を適当に選ぶことによって、プラズマ全領域を $0 < n < 1.5$ の範囲内に収めることができる (図 2・a 参照) が、ダイバータ放電では、M コイル電流があるため、プラズマ中心では $0 < n < 1.5$ であっても、トーラス外側の X 点近傍では垂直磁場が反転し、 $n\text{-index}$ が $+\infty$ から $-\infty$ まで変化する (図 2・b 参照)。従って、プラズマ領域内で、この様に $n\text{-index}$ が大きく変化する場合にも、位置安定性があるか検討が必要である。

JT - 6 0 位置安定性に関しては、これまでに、二宮らによる剛体モデルによる解析が行われ、リミタ放電では、およそ $0 < n < 1.5$ で安定、ダイバータ放電では、 $n < 2.3$ で安定という結果が得られている。しかし、熊谷らによると、変位の空間分布を考慮したモデルに対して、剛体モデルの方がより安定な結果が出ると報告されている。そこで、本報告では理想的 MHD 安定性解析コード (ERATO-J)⁽²⁾ を用いて、JT - 6 0 の位置安定性に対して調べる。

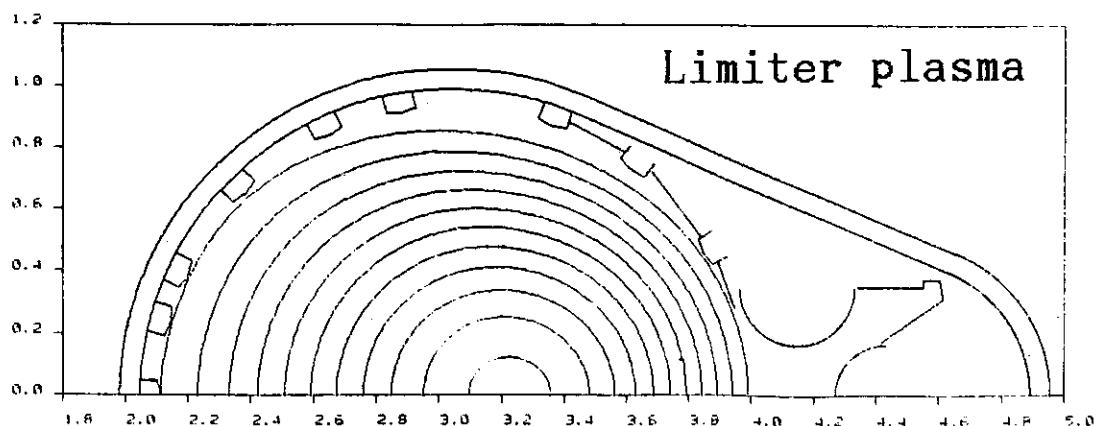
第 2 章では、計算の概要として、主な計算パラメータと計算の特徴を述べ、第 3 章では幾つかのパラメータに対して得られた計算結果を表わし、第 4 章でまとめとして、実際のオペレーションにおける安定領域について述べる。



(a) ポロイダルコイル配置図

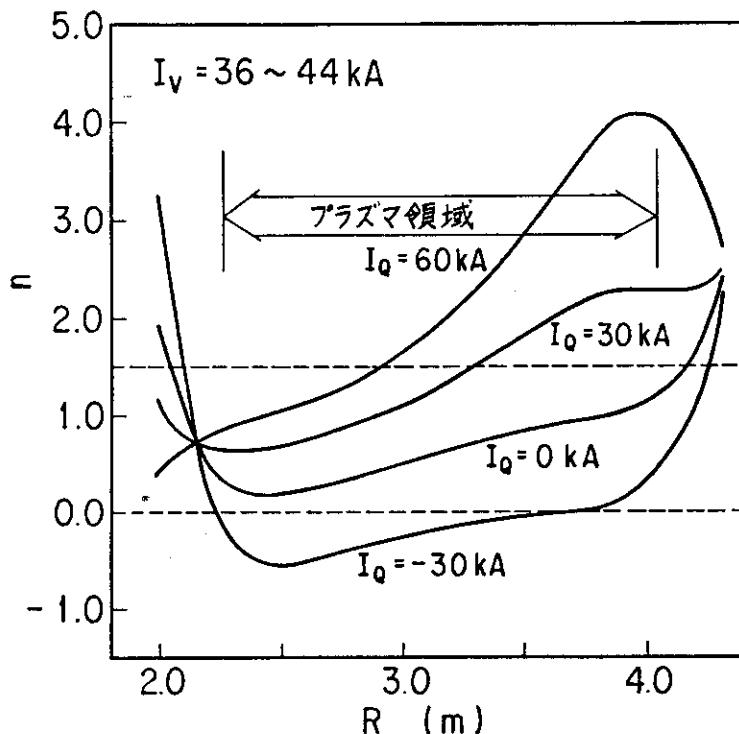
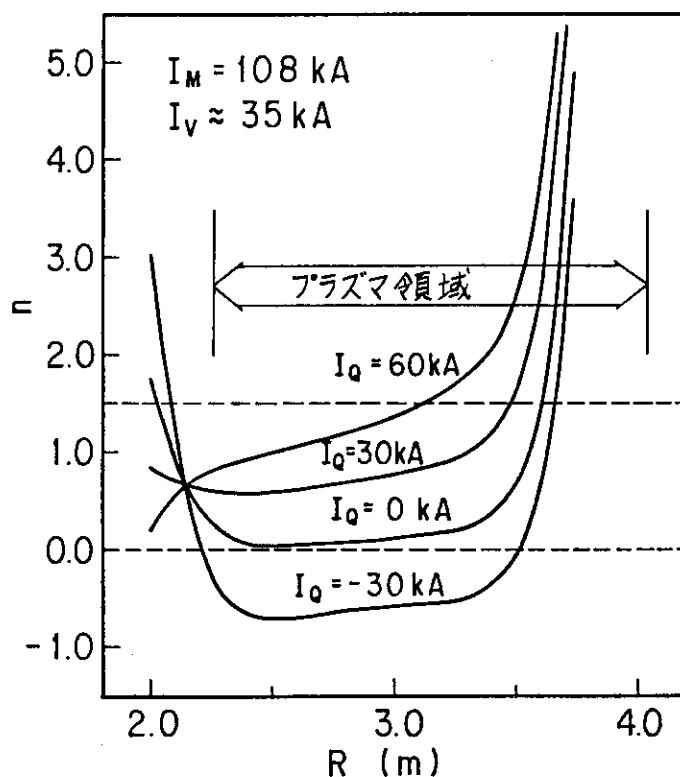


(b) ダイバータ配位におけるプラズマ断面の例



(c) リミタ配位におけるプラズマ断面の例

図 1 JT-60のポロイダルコイル配置及びプラズマ断面の例

図 2.a リミタ配位における n - index 分布図 2.b ダイバータ配位における n - index 分布

2. 計 算 の 概 要

本報告で用いた計算コードは、Grad-Shafranov 方程式を解く MHD 平衡計算コードと、線形理想MHD 安定性解析コード ERATO-J である。

a) 平衡計算コード

このコードは、Grad-Shafranov 方程式を四角形要素について差分化し、Buneman's algorithm で解いている。プラズマ電流 j_P 、ベータ値 β_P 、Qコイル、Mコイルなどの外部コイル電流が与えられたとして、プラズマの平衡配位（磁束関数 ψ など）が得られる。

本解析の計算では、ERATO-J での計算精度を上げるために、R 方向 × Z 方向のメッシュ数を 512×256 とした。これは実機の寸法で $5.5 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$ である。さらに、収束条件 ϵ を

$$\epsilon = \frac{\max |\psi_{ij}^n - \psi_{ij}^{n-1}|}{\max |\psi_{ij}^n|} \leq 10^{-6}$$

とした。

また、X点 ($B_P = 0$)におけるメトリック係数の特異性をさけるため、 $\delta\psi_{sep}$ だけ内側の磁気面をプラズマの境界とした。ここで $\delta\psi_{sep} = 10^{-3} \times \psi_{axis}$ である。

b) 安定性解析コード

ERATO-J は、線形理想MHD 安定性解析コードで、変分形の線形MHD 方程式 $\delta(W_P + W_V + W_K) = 0$ を混成有限要素法を用いて、固有値問題に変換し求めている。⁽⁴⁾

J T - 6 0 の計算に際し、次の点に注意して行った。すなわち、ダイバータ配位での放電を考慮して、プラズマの表面及びX点付近のメッシュを細かくした（図3 参照）。この場合の、メッシュ数に対する不安定成長率の依存性を調べると、図4の様に、直線に乗り且つ傾きの小さい良い2乗収束性が得られた。

この図で、成長率 r^2 は、次式の様にポロイダルアルフベン速度 v_A で、規格化した値である。

$$r^2 = \frac{\hat{\gamma}^2}{\left(\frac{v_A}{R}\right)^2} = \frac{\hat{\gamma}^2}{\left(\frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}}\right)^2}$$

J T - 6 0 では、およそ $\hat{\gamma} \approx 4.6 \times 10^{-6} (1/s)$ で $r = 1$ となる。

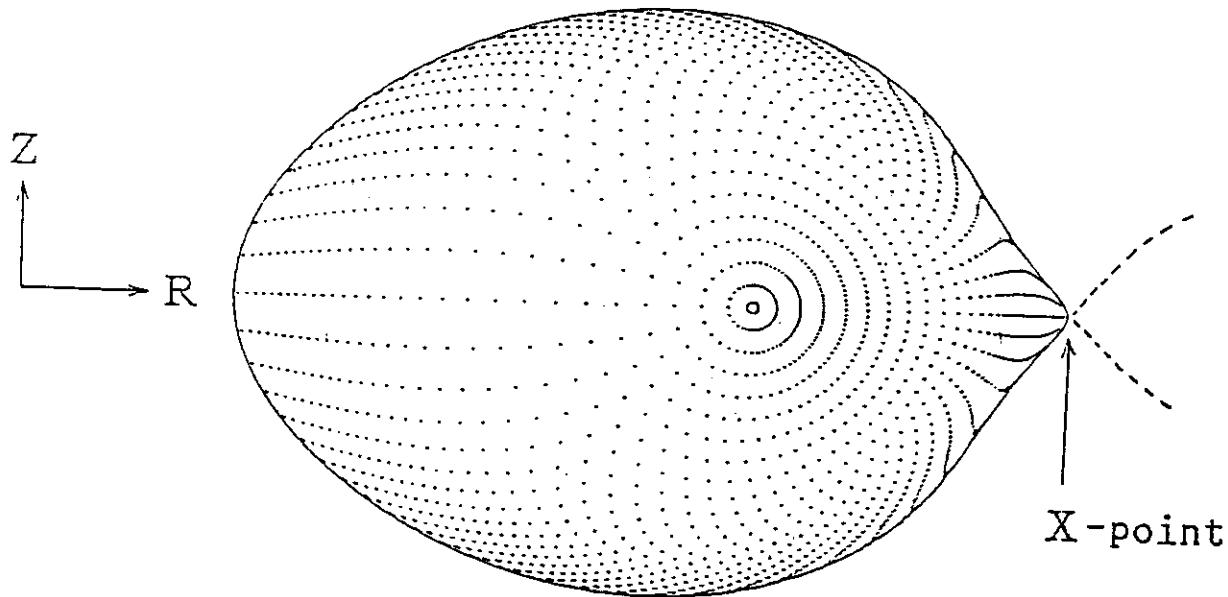


図3 Mesh accumulation

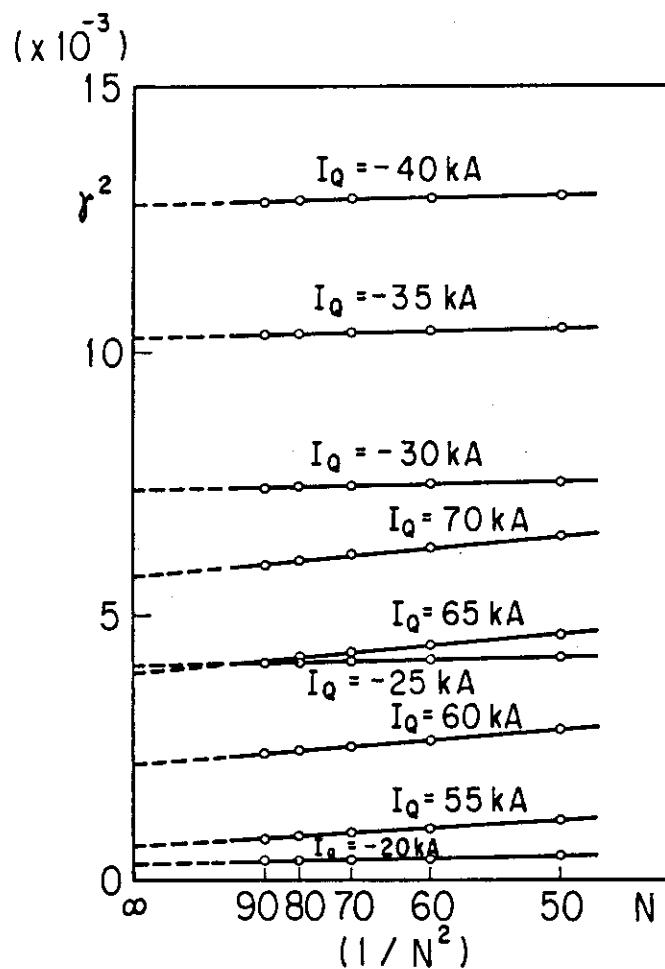


図4 不安定性成長率の自乗収束の例

3. 計 算 結 果

3.1 ダイバータ配位における安定領域

Mコイル電流を一定にしてQコイル電流を負から正に振って n -indexを変えた場合の不安定性成長率 r^2 の依存性を図5に示す。ここで、導電性シェルは置かれていないとする。電流分布は、放物型($\ell_i \approx 1.0$)とし、 β_P は0.01, 1.0, 2.0の場合について求めた。(このときの諸パラメータを表1に示す) 図5より、 $n \leq -0.25$ で、プラズマ断面が縦長(楕円度 $e \approx 1.00 \sim 1.03$)になり上下方向に不安定、 $n \geq 1.2$ でプラズマ断面が横長(楕円度 $e \approx 0.61 \sim 0.86$)になり水平方向に不安定になっている。安定な領域は、 $0 < n < 1.5$ より若干シフトしているが、十分な安定領域があり、 β_P によっても大きな違いは見られない。ここで、図中の n -indexは磁気軸上の値を用い、成長率は図4と同様、ポロイダルアルフベーン速度で規格化している。

ダイバータ配位プラズマとリミタ配位プラズマの比較をした結果が図6である。 β_P が1.0で電流分布が放物型である場合で、安定領域に多少のずれがあるが、ほぼ同様の位置安定性が得られている。

3.2 剛体変位モデルとの比較

二宮らによる剛体変位モデルの解析⁽²⁾では、ダイバータ放電のとき垂直方向変位に対して安定であり、水平方向変位も n -indexで2.3まで安定であると述べており、本解析結果と大きく異なる。

そこで、これらの不安定性を変位分布図によって調べた。図7・aは、垂直方向に不安定になった場合の摂動の変位ベクトルを示したものである。変位は、リミタ配位プラズマもダイバータ配位プラズマもプラズマ断面全体で起きているが、ダイバータ配位プラズマでは、X点付近の変位が極端に小さい。このときの $Z = 0$ 上のZ方向変位のR分布を図7・bに示す。トーラスの外側で、共に変位が小さいのは、Qコイル磁場の影響であるが、ダイバータ配位プラズマでは、Mコイルによって外側での変位がさらに小さく、X点を中心に回転する様な動きをし、剛体変位モデルとは大きく異なる。

次に、水平方向に不安定になった場合の摂動の変位ベクトルを図8・aに示す。リミタ配位プラズマは、ほぼ剛体的な動きをするのに対して、ダイバータ配位プラズマは、プラズマ内部の動きが小さく、表面で大きく、X点へ流れ込む様な動きをする。また、図8・bは、 $Z = 0$ 上のR方向変位のR分布を表わし、ダイバータ配位プラズマでは、X点付近の動きが大きく、内部では小さいことがわかる。

以上のことから、ダイバータ配位プラズマでは、垂直方向変位でも水平方向変位でも、局部的な変位が大きい(あるいは小さい)。そのため、剛体モデルの様に摂動をプラズマ断面全体

で均一とすると安定であっても、変位の空間分布を考慮したモデル（ERATO-J）では、不安定になる。

3.3 電流分布による位置安定性への影響

ダイバータ配位プラズマで、 $\beta_P = 1.0$ のときにプラズマ電流の分布を変えた場合の位置安定性を図 9 に示す。放物型の電流分布 ($J(\psi) \propto 1 - \psi$, $\ell_i \approx 1.0$) を中心として、分布が平坦な場合 ($J(\psi) \propto 1 - \psi^2$, $\ell_i \approx 0.8$) は n -index の小さい方へ、分布がピーク ($J(\psi) \propto (1 - \psi)^2$, $\ell_i \approx 1.5$) するにつれて n -index の大きな方へ安定領域がずれる。また、安定な領域の幅は、電流がピークするにつれて徐々に広がる傾向にある。一方、リミタ放電では、電流分布のピーク化によっても、安定領域の大きな移動は見られない（図 10 参照）。

そこで、ピーク型電流分布の場合で、 n -index を一定（Qコイル電流もほぼ一定）とし、Mコイル電流を零（零のときリミタ配位プラズマ）からダイバータ配位プラズマ時の電流（108 KA）まで増やした場合を検討する。図 11 は、このときの不安定性成長率のMコイル電流依存性を示す。Mコイル電流の増加（ダイバータ配位へ変化）によって安定から不安定に変化していることがわかる。

理想的MHD 不安定性は、擾動 ξ に対する系のポテンシャルエネルギーが大きくなるとき安定 ($\delta W > 0$)、小さくなるときは、逆に不安定 ($\delta W < 0$) となる。ここで、 δW は次式で表わされる。⁽⁵⁾

$$\delta W = W_P + W_S + W_V$$

$$W_S = \frac{1}{2} \int \left[\nabla \left(P_0 + \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) \right] (\xi \cdot n)^2 dS \quad (\text{表面エネルギー})$$

$$W_V = \frac{1}{2\mu_0} \int dV |B_{V1}|^2 \quad (\text{真空磁場エネルギー})$$

$$W_P = \sum_1^5 W_i \quad (\text{各項は、アルフベン波、磁気音波、音波、電流駆動項、圧力駆動項})$$

前述のMコイル電流を変えた場合（Qコイル電流一定）の各エネルギーを、運動エネルギー W_K で規格化して図 12 に示す（ここでは $W_S = 0$ ）。図より位置不安定性の要因となる W_P （垂直方向変位の場合電流駆動項が大きい）は、ほとんど変化が見られず、安定化に働く真空磁場エネルギー W_V の減少によって不安定化されていることがわかる。

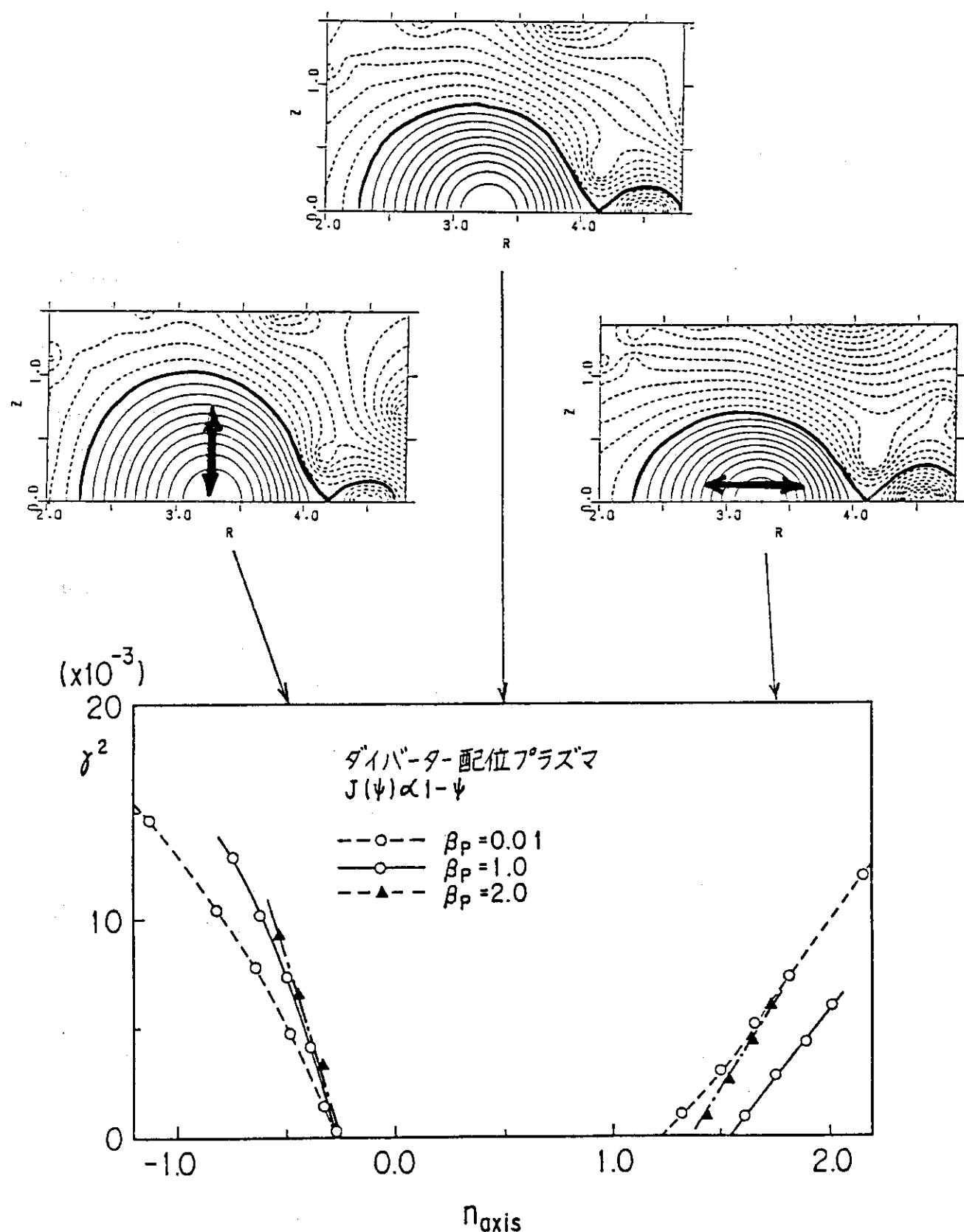
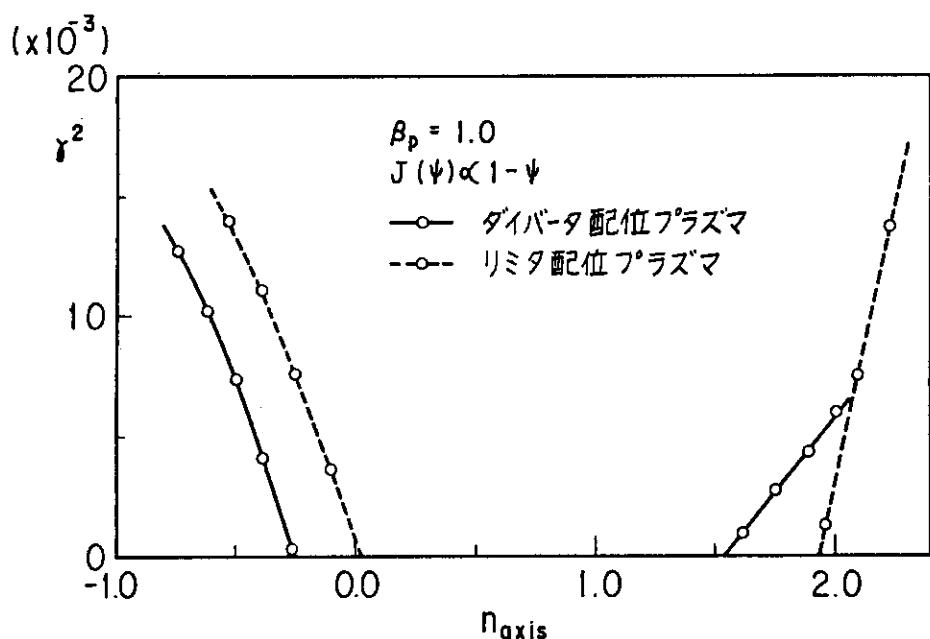
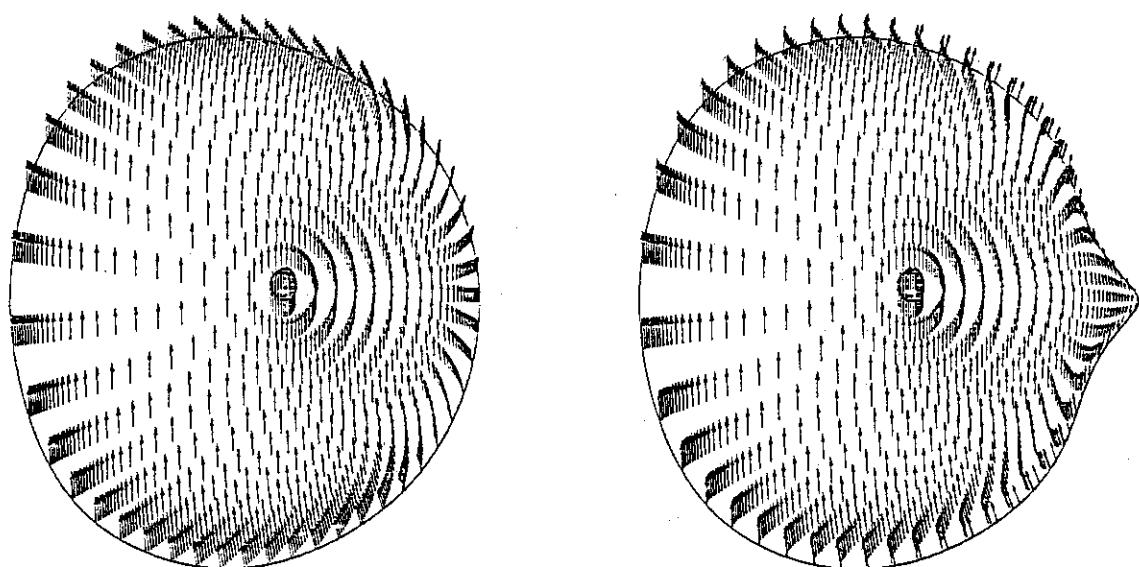
図 5 β_p が異なる場合の n - index に対する位置不安定性成長率

表 1 ダイバータ配位プラズマ生成時の諸パラメータ

β_p	0.01	1.0	2.0
I_M (KA)	84	104	120
I_P (MA)	2.0	2.0	2.0
B_T (T) at $R = 3.15\text{m}$	4.5	4.5	4.5
R_p (m)	3.15	3.15	3.1
r_p (m)	0.86	0.89	0.9
$J(\psi)$ (ℓ_1)	$1 - \psi$ (≈ 1.0)	$1 - \psi$ (≈ 1.0)	$1 - \psi$ (≈ 1.0)

図 6 ダイバータ配位プラズマとリミタ配位プラズマの場合の
 $n - \text{index}$ に対する位置不安定性成長率



JAERI TOKAI "ERATO-J"
 $N = 0.0$ QAXIS = 1.2219
 QSURF = 4.0214
 $A = 3.539$ BETAP = 1.054

JAERI TOKAI "ERATO-J"
 $N = 0.0$ QAXIS = 1.2066
 QSURF = 4.0982
 $A = 3.387$ BETAP = 1.125

図 7.a リミタ配位プラズマ（左図）及びダイバータ配位プラズマ（右図）における垂直方向変位図

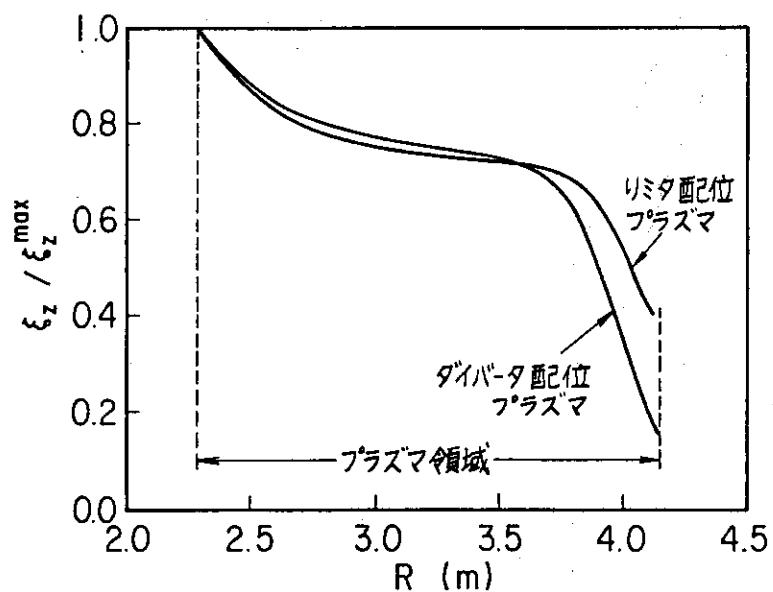


図 7.b 垂直方向変位の R (大半径) 分布

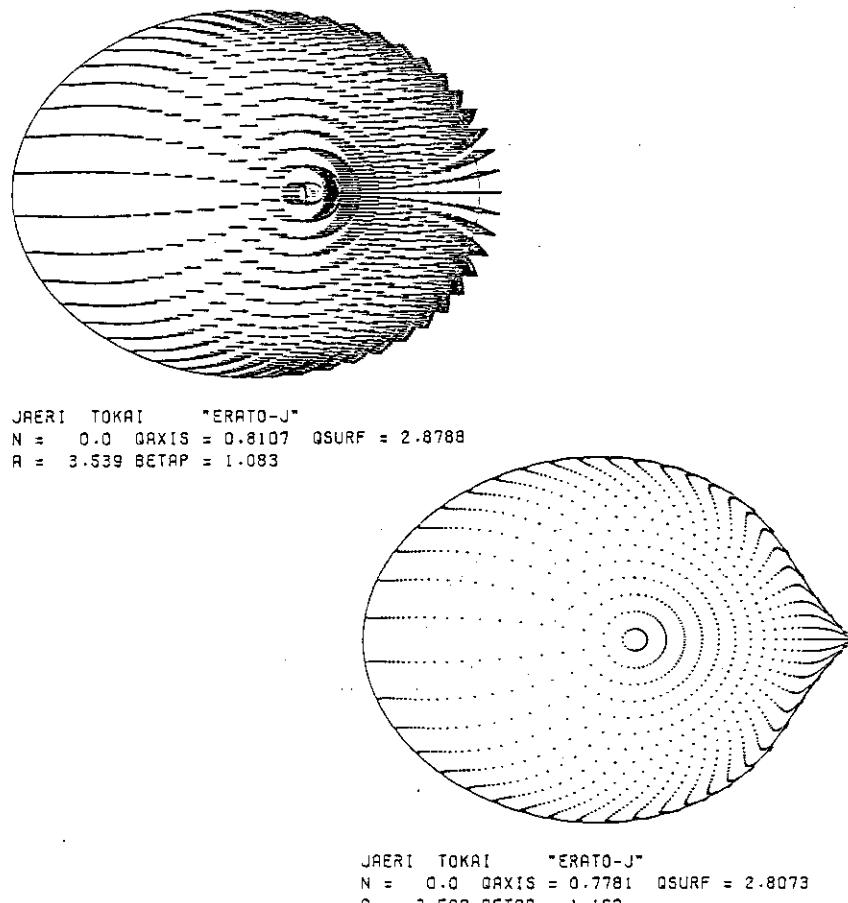


図 8.a リミタ配位プラズマ（上図）及びダイバータ配位プラズマ（下図）における水平方向変位図

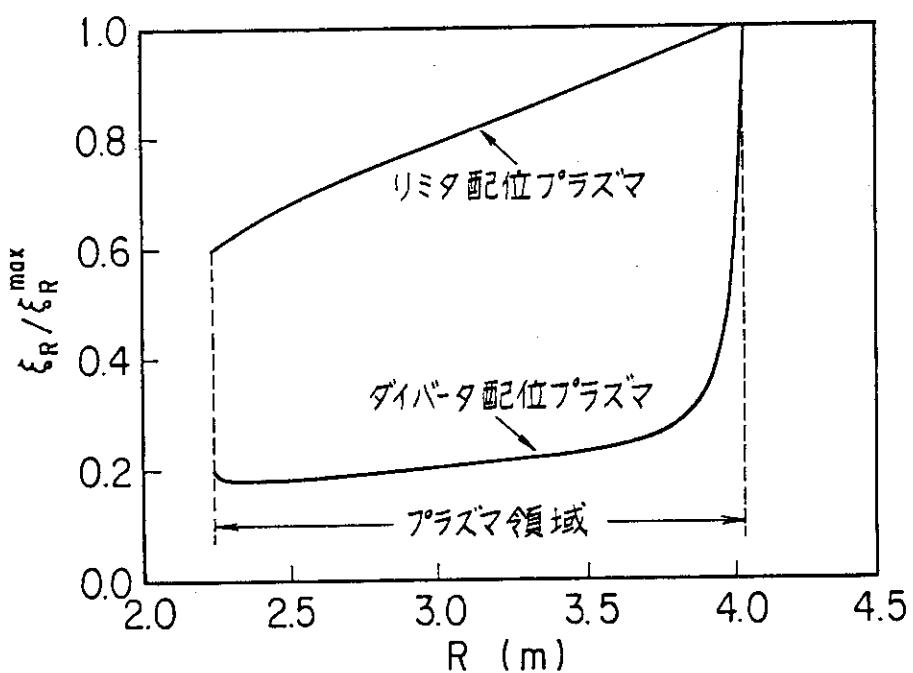


図 8.b 水平方向変位の R (大半径) 分布

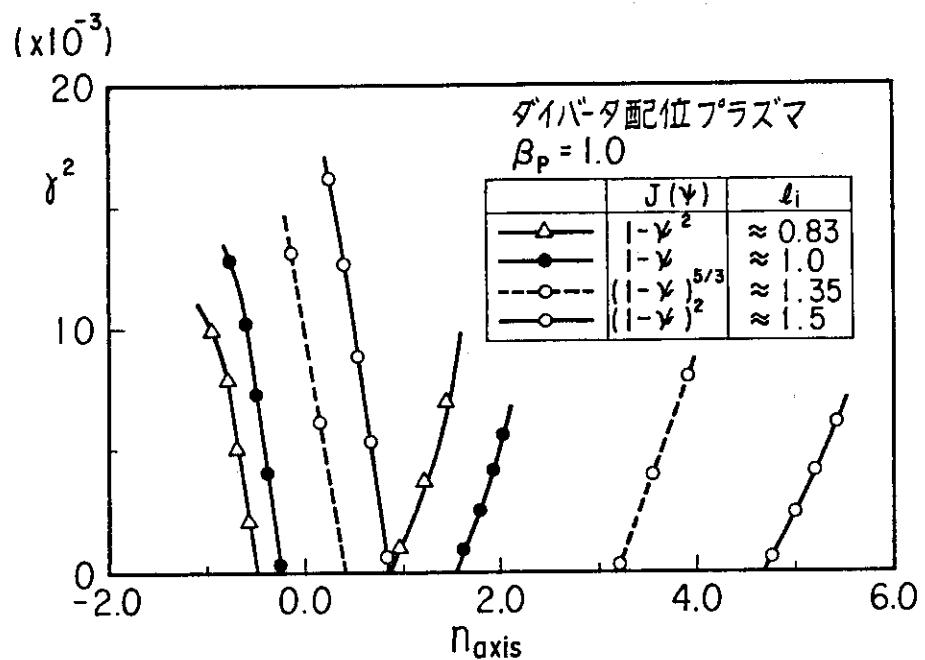


図 9 プラズマ電流分布が異なる場合の位置不安定性成長率
(ダイバータ配位)

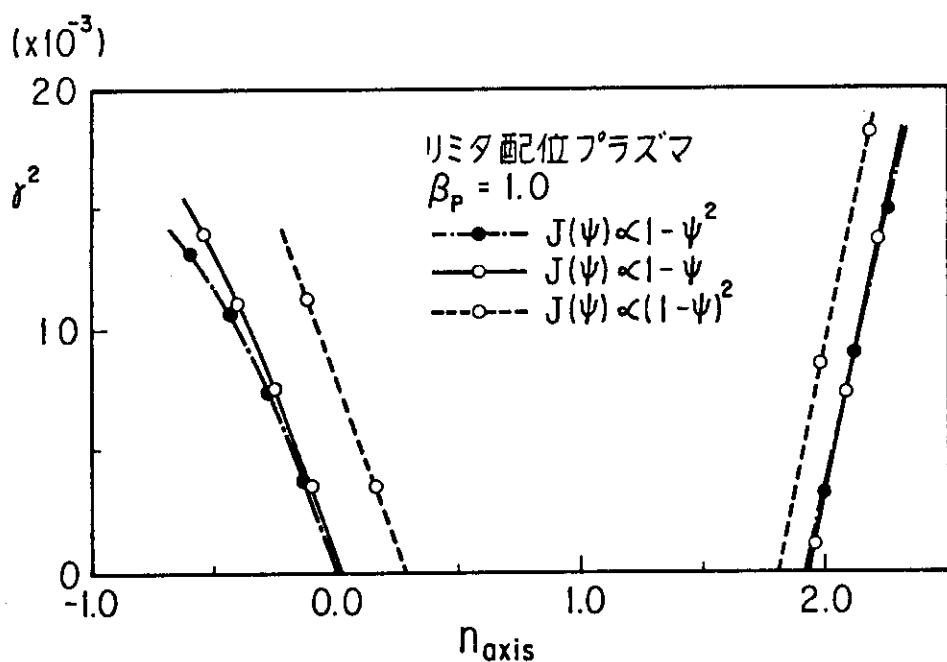


図 10 プラズマ電流分布が異なる場合の位置不安定性成長率
(リミタ配位)

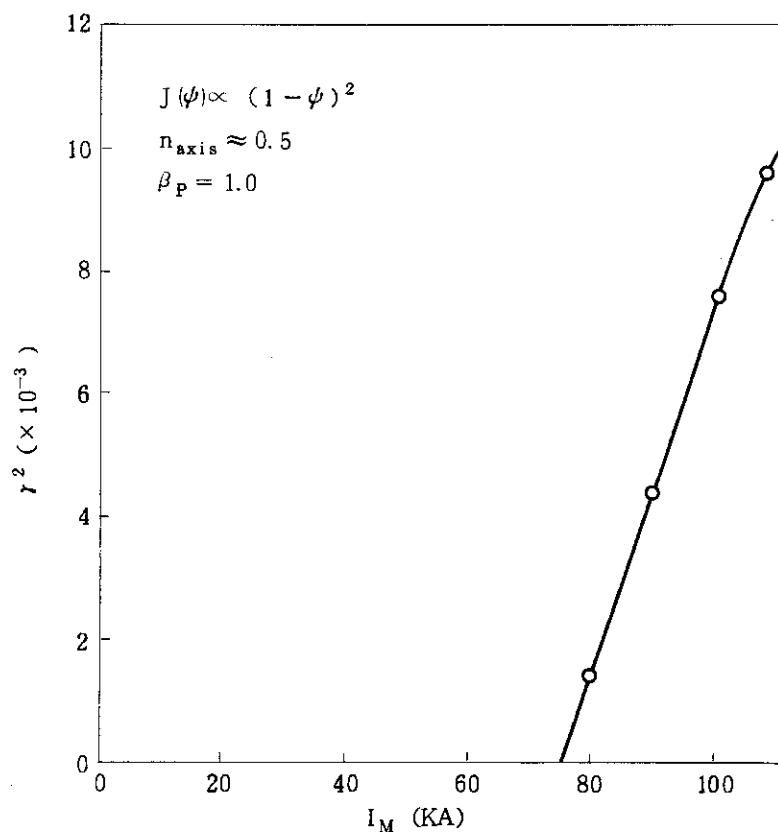


図 11 ピーク型電流分布でMコイル電流を変化させた場合
(n_{axis} 一定) の不安定性成長率

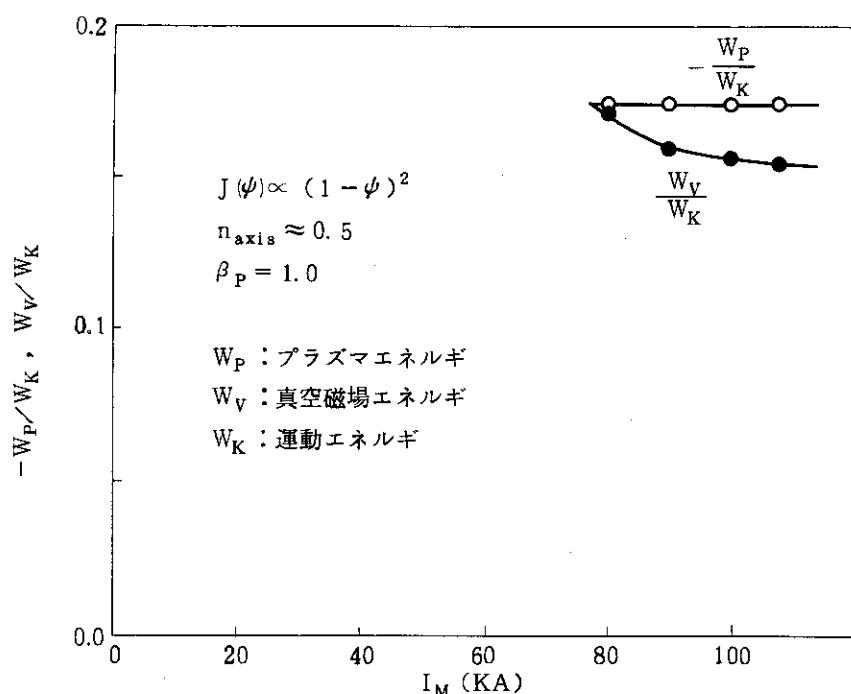


図 12 ピーク型電流分布でMコイル電流を変化させた場合
(n_{axis} 一定) のポテンシャルエネルギー

4. 結 論

J T - 6 0 の実際のダイバータ放電時には、平衡配位の実時間制御を行っている。すなわち、プラズマの位置制御の観点から、 δ_t , δ_{30} , δ_{52} (図 1 3 参照) をパラメータとして選び、リミタ, Mコイルライナ等とのクリアランスを保つ様に制御される。⁽⁶⁾ 図 1 3 は、吉田らによって作成された $\beta_P = 1.0$ の場合の制御ダイアグラムであり、実際の放電は、Mコイル電流、Qコイル電流が斜線の領域内に設定される ($\delta_{30} \approx 2 \sim 4$ cm, $\delta_t \approx 4 \sim 6$ cm, $\delta_{52} > 2$ cm)。

このダイアグラムの制御領域を図 5 の位置不安定性の図に書き直せば、図 1 4 の斜線部分になる。すなわち、放物型電流分布のプラズマに対して、 β_P が 0.01 ~ 2.0 において、十分な位置安定性がある。(ここでは、真空容器及びボロイダルコイルの Shell 効果は、入っていない)

3.2 節で示した様にダイバータ配位においては、電流分布がピークした場合、安定な領域が n -index の大きな方へシフトする。図 1 5 は、 n -index と電流分布 (ℓ_i) 平面上における安定領域を示したもので、 $B_T = 4.5$ T, $I_P = 2$ MA の場合の磁気軸上での安全係数 q_0 が 1 となる線も合わせてプロットした。磁気軸上での安全係数 q_0 は、sawtooth 振動等によって 1 に制限される為、J T - 6 0 のダイバータ放電のオペレーション領域においては、安定領域のシフトは問題とならない。しかし、電流分布に対する n -index 安定領域の強い依存性については、物理機構の解明を含め今後の検討が必要である。

以上述べた事をまとめると、次の 3 点が挙げられる。

- (1) トーラスの外側に X 点を持つダイバータ配位に対しても、広い範囲 ($-0.25 < n < 1.2$) で位置安定性がある。
- (2) 垂直方向変位は、X 点付近の変位が小さく、X 点を中心に回転する動きを示し、一方、水平方向変位は、プラズマ表面に局在すると共に、X 点に流れ込むパターンを示しており、共に剛体変位から大きくずれる。
- (3) 電流分布がピークした場合、 n -index の安定な領域は n の大きい方へ大きくシフトする。ただし、J T - 6 0 における標準的なダイバータ放電パラメータ ($B_T = 4.5$ T, $I_P = 2$ MA, $q_0 > 1$) では問題とならない。

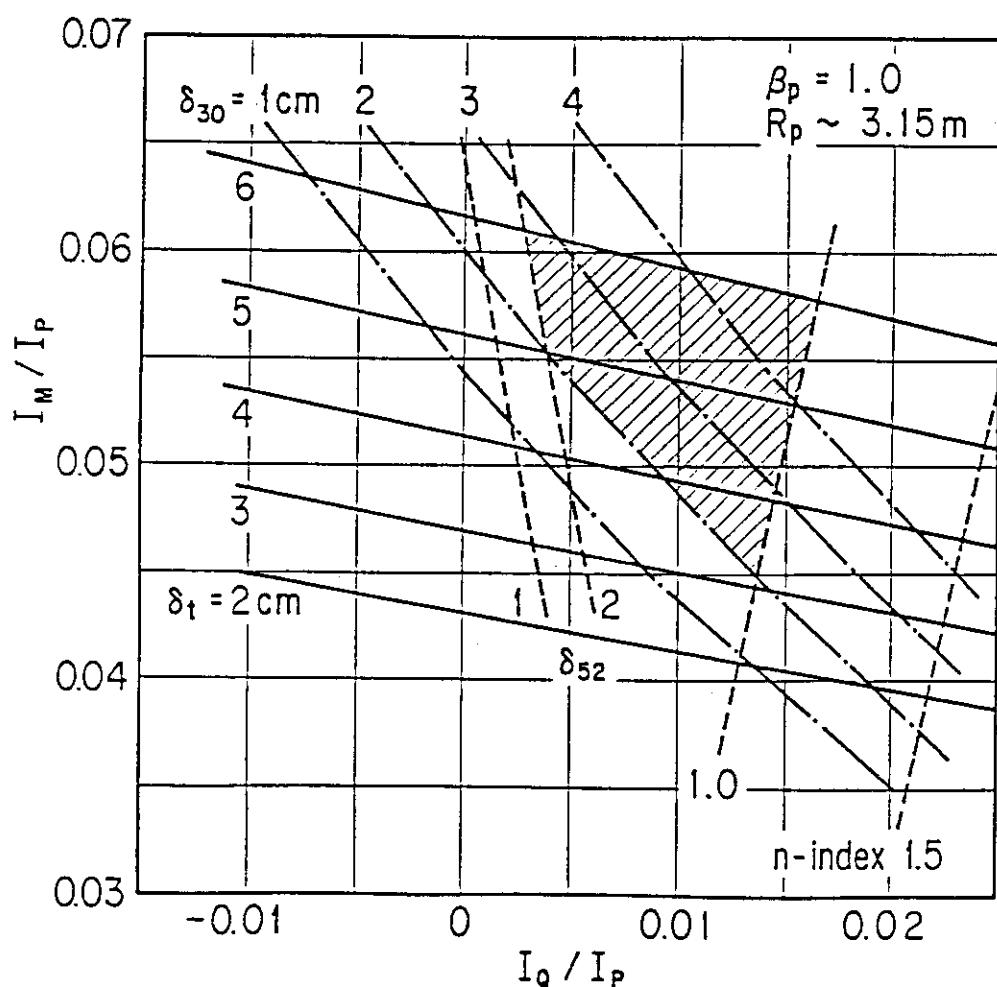
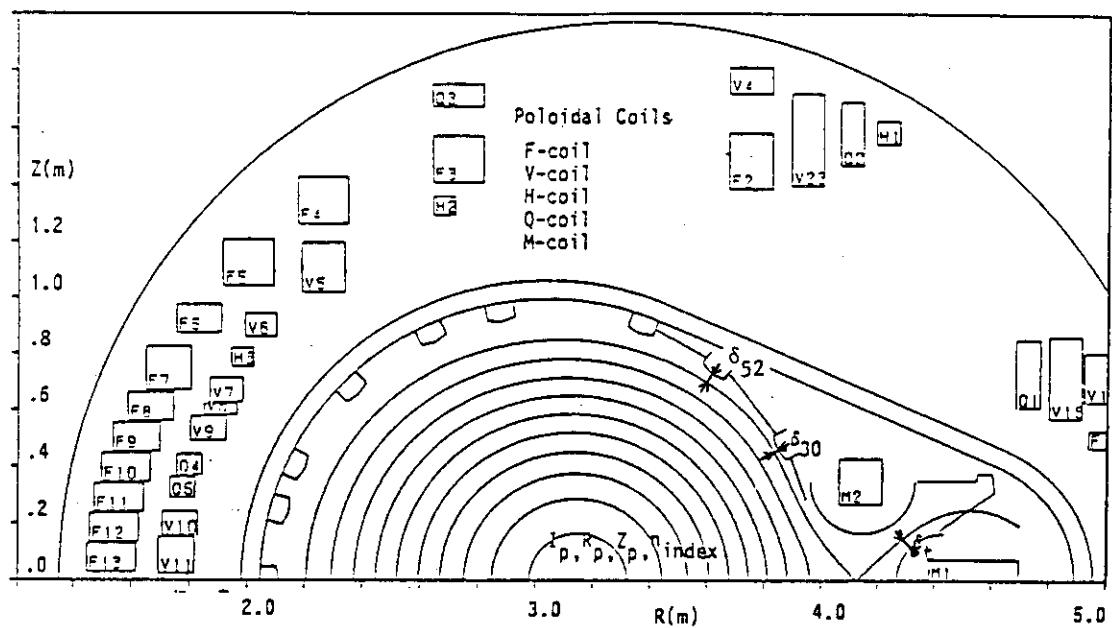


図13 ダイバータ配位 プラズマの制御領域
(JAERI-memo 59-243 吉田他より)

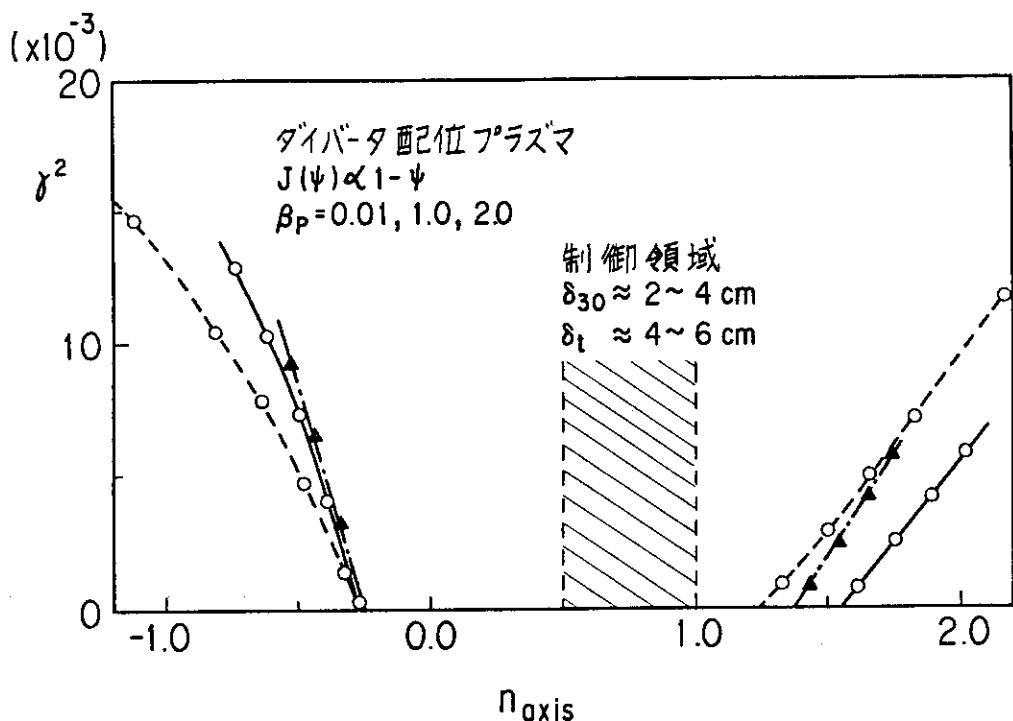
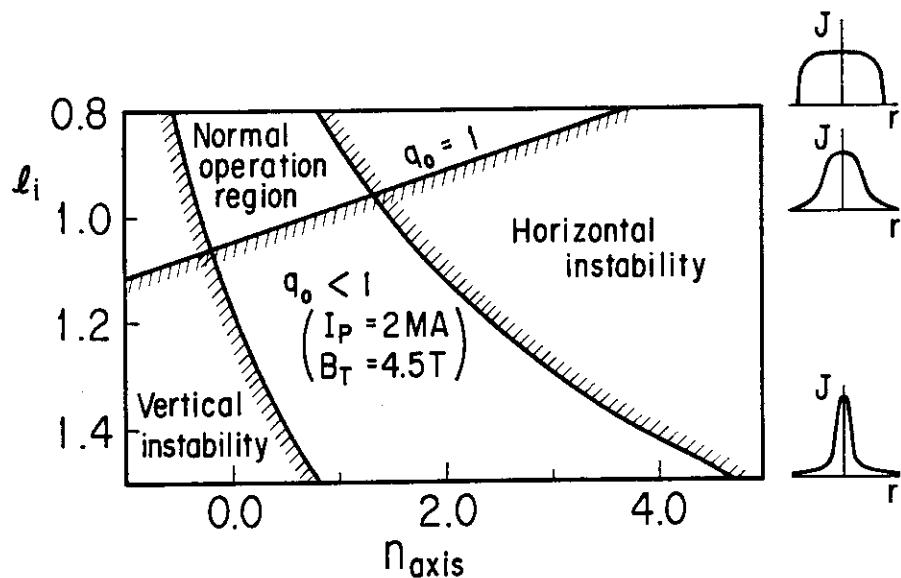


図14 JT-60における制御領域の位置安定性

図15 \$n\$-index と \$\ell_i\$ 平面での位置安定性領域、及び \$q_0 > 1\$ 領域。
(ダイバータ配位, \$I_P = 2 \text{ MA}\$, \$B_T = 4.5 \text{ T}\$)

謝　　辞

本検討を行うにあたり、有益な討論をしていただいた臨界プラズマ実験室解析グループの皆様に深く感謝致します。さらに、終始ご指導、ご鞭撻戴いた吉川允二臨界プラズマ研究部長、田村早苗次長、鈴木康夫実験室長に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Yoshikawa : Phys. of Fluids 7 (1964) 278.
- 2) H. Ninomiya, Y. Suzuki, A. Kameari : Jpn. J. Appl. Phys. vol. 15, No. 11 (1976) 2201.
- 3) 熊谷道一, 常松俊秀, 徳田伸二, 竹田辰興: “ERATOによるトカマクプラズマの位置不安定性解析”, JAERI-M 83-085 (1983)。
- 4) 徳田伸二, 常松俊秀, 安積正史, 滝塚知典, 奈良岡賢逸, 竹田辰興, “改訂版 ERATO-J によるMHD 安定性解析”, JAERI-M 9899 (1982)。
- 5) 例えは, G. Bateman : “MHD Instabilities”, MIT Press, (Cambridge, Massachusetts and London, 1978)。
- 6) 吉田英俊, 二宮博正, 芳野隆治, 菊池　満, 辻　俊二, 細金延幸, 関　省吾; “JT-60 磁気リミタ平衡配位の解析”, 未公開資料 (1984)。

謝　　辞

本検討を行うにあたり、有益な討論をしていただいた臨界プラズマ実験室解析グループの皆様に深く感謝致します。さらに、終始ご指導、ご鞭撻戴いた吉川允二臨界プラズマ研究部長、田村早苗次長、鈴木康夫実験室長に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Yoshikawa : Phys. of Fluids 7 (1964) 278.
- 2) H. Ninomiya, Y. Suzuki, A. Kameari : Jpn. J. Appl. Phys. vol. 15, No. 11 (1976) 2201.
- 3) 熊谷道一, 常松俊秀, 徳田伸二, 竹田辰興：“ERATOによるトカマクプラズマの位置不安定性解析”, JAERI-M 83-085 (1983)。
- 4) 徳田伸二, 常松俊秀, 安積正史, 滝塚知典, 奈良岡賢逸, 竹田辰興, “改訂版ERATO-JによるMHD安定性解析”, JAERI-M 9899 (1982)。
- 5) 例えは, G. Bateman : "MHD Instabilities", MIT Press, (Cambridge, Massachusetts and London, 1978)。
- 6) 吉田英俊, 二宮博正, 芳野隆治, 菊池　満, 辻　俊二, 細金延幸, 関　省吾; “JT-60磁気リミタ平衡配位の解析”, 未公開資料 (1984)。