JAERI-M
86-025

JT-60に於ける限界ベータ値
（1）バルーニング不安定性

1986年3月

関　省吾・安積　正史

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, 1986

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　いばらき印刷㈱

JAERI－M 86－025

ＪＴ－60に於ける限界ベータ値
(1) バルーニング不安定性

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部
関　省吾・安積正史

（1986年1月30日受理）

ＪＴ－60プラズマの理想的ＭＨＤバルーニング不安定性に対する限界ベータ値を，ダイバータ配位に重点を置いて調べた。限界ベータ値は，安全係数ｑ（Ψ）分布，特に磁気軸での安全係数q_0に強く依存する。$q_0 = 1.0$の場合，$\beta_c \sim 2\%$，$q_0 = 1.5$では，$\beta_c \gtrsim 3\%$が期待できる。ＪＴ－60実験での高ベタープラズマ実現のために$q_0 \gtrsim 1.5$の分布制御の重要性が判明した。

那珂研究所：茨城県那珂郡那珂町大字向山

JAERI-M 86-025

Maximum β Limited by Ideal MHD Ballooning Instabilites in JT-60

Shogo SEKI and Masashi AZUMI

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

(Received January 30, 1986)

Maximum β limited by ideal MHD ballooning instabilities is investigated on divertor configurations in JT-60. Maxium β against ballooning modes in JT-60 has strong dependecy on the distribution of the safety factor over the magnetic surfaces. Maximum β is ∿2% for q_0=1.0, while more than 3% for q_0=1.5. These results suggest that the profile control of the safety factor, especially on the magnetic axis, is attractive to the higher β operation in JT-60.

Keywords: JT-60, Ideal MHD Ballooning, Safety Factor, Maximum β

目　　次

1. はじめに …… 1
2. 限界ベータ値の算出手順 …… 2
3. バルーニング不安定性に対する限界ベータ値 …… 4
3.1 $q_o = 1.0$ …… 4
3.2 $q_o = 1.5$ …… 5
4. ま と め …… 15
参考文献 …… 15
Appendix …… 16

Contents

1. Introduction …… 1
2. Numerical Procedure for Maximum β …… 2
3. Maximum β Limited by Ideal MHD Ballooning Instabilities …… 4
3.1 q_0=1.0 …… 4
3.2 q_0=1.5 …… 5
4. Conclusions …… 15
References …… 15
Appendix …… 16

1. はじめに

ＪＴ－60では，昭和62年末の臨界プラズマ達成を目指したプラズマ加熱実験が昭和61年度より開始されようとしている。ＪＴ－60の目標である臨界プラズマは，$\bar{n}\tau_E \gtrsim 2\times10^{19}$ m^{-3} sec，平均プラズマ温度$<T>\gtrsim 5$ keVであり，そのベータ値は，1.5～2.0％以上となる。一方，トカマクに於いて達成可能な限界ベータ値は，MHD安定性により大きく支配されると予想されている[1),2)]。従って，ＪＴ－60に於いて，MHD安定性より期待される限界ベータ値の研究が必要となる。本報告は，この観点から，ＪＴ－60に於ける理想的MHDバルーニング不安定性（$n\rightarrow\infty$ モード）に対する限界ベータ値を，Connor－Hastie－Taylor条件[3)]より求めたものである。

ＪＴ－60の臨界プラズマ実験にあっては，閉じ込め性能（言ゆるH－ mode）の観点からダイバータ配位による加熱実験が重要となろう。従って，本報告では，ＪＴ－60のダイバータ配位に於けるバルーニング不安定性に対する限界ベータ値を中心に報告する。ダイバータ配位に於けるJT－60の装置仕様は，以下の通りである。

プラズマ電流 I_p	2.1 MA（最大）
プラズマ主半径 R_p	3.10～3.15 m
プラズマ小半径 a_p	0.83～0.85 m（平均）
トロイダル磁場 B_T	4.5 T（最大，at R = 3.0 m）

以下，第2章では，バルーニング不安定性に対する限界ベータ値算出の手順について説明する。ここで採用した手順は，MHD平衡は，低ベータで$q(\Psi)$分布を設定し，磁束保存（FCT）条件を拘束条件として遂次高ベータ平衡を求め，その毎Connor－Hastie－Taylor（C－H－T）条件をチェックする方法である。第3章では，この手順より求めたJT－60ダイバータ配位プラズマのバルーニング不安定性に対する限界ベータ値（β_c），及び高ベータダイバータ配位に於ける各種データを提供する。比較のために，固定リミタ配位プラズマの場合についても説明する。まとめは，第4章に記す。

2. 限界ベータ値の算出手順

バルーニング不安定性に対する限界ベータ値の算出手順は以下のフローである(第1図参照)。

(1) Low β 平衡設定

- low β (本報告では $\beta_J = 0.15$) に於て，希望する q(Ψ) 分布を実現するプラズマ電流分布を設定する。
- MHD平衡は，上下対称を仮定する。
- Grad－Shafranov方程式の数値計算に於ける格子点は，R方向129点，Z方向65点である。計算領域は，第5図以下に示した磁気面断面図を参照のこと。
- ダイバータ配位時の最外殻磁気面 Ψ_s は，

$$\Psi_s = \Psi_{sep} + 5 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{\Psi_{axis} - \Psi_{sep}}{\Psi_{axis}} \right)$$

で与える。ここで，Ψ_{sep} はセパラトリックス磁気面の磁束関数，Ψ_{axis} は，磁気軸の磁束関数である。すなわち，本計算では，$\Psi_s \sim \Psi_{sep}$ 間はP＝0を仮定する。

(2) Connor－Hastie－Taylor 条件評価[3)]

- バルーニング不安定性に対する安定限界を与えるC－H－T条件を，(1)または(3)で設定した平衡について評価する。
- C－H－T条件算出時の格子点は，$\Psi_{axis} \sim \Psi_s$ 間20等分，ポロイダル角0～π 間50等分である。また，C－H－T条件の積分領域は，ポロイダル角換算± 10π である。(格子点数及び積分領域の選定についての詳細は附録を参照のこと)
- 算出されたシアー対圧力勾配関係図（s－α図）と比較し，与えられた平衡の圧力勾配が限界圧力勾配 $|dP/d\Psi|_c$ に達しているか判定する。

(3) Higher β 平衡

- 新しい圧力勾配を設定する。

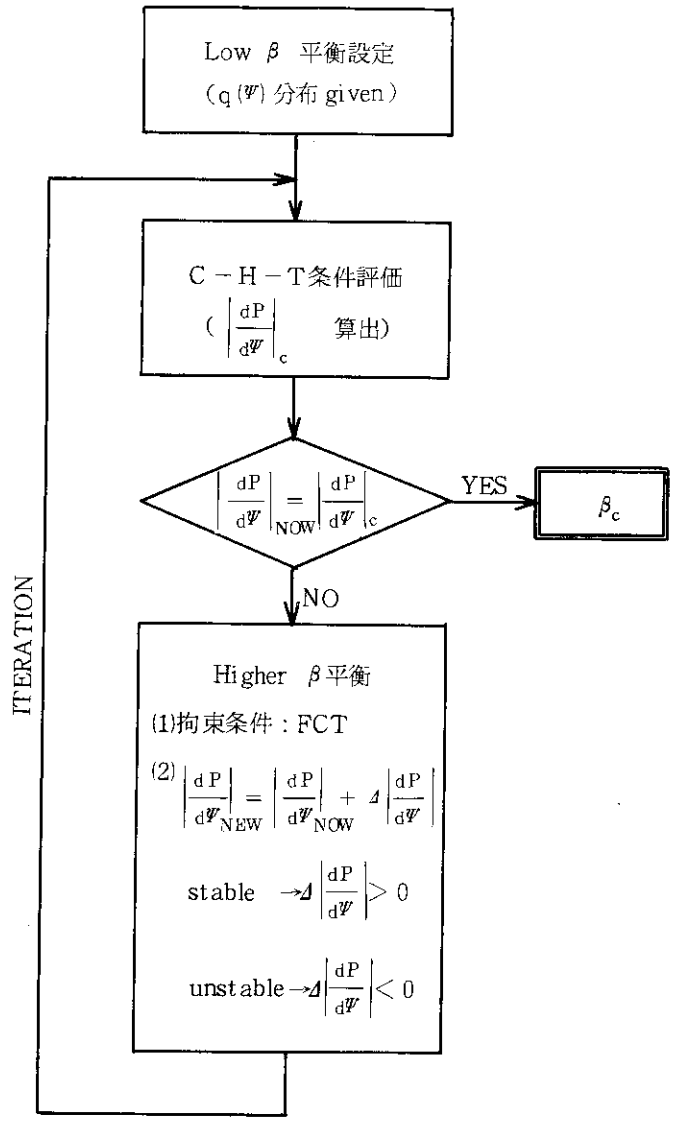
$$\left|\frac{dP}{d\Psi}\right|_{NEW} = \left|\frac{dP}{d\Psi}\right|_{NOW} + \Delta \left|\frac{dP}{d\Psi}\right|$$

$$\left|\frac{dP}{d\Psi}\right|_{NOW} < \left|\frac{dP}{d\Psi}\right|_{C} \quad \text{の時,} \quad \Delta \left|\frac{dP}{d\Psi}\right| > 0$$

$$\left|\frac{dP}{d\Psi}\right|_{NOW} > \left|\frac{dP}{d\Psi}\right|_{C} \quad \text{の時,} \quad \Delta \left|\frac{dP}{d\Psi}\right| < 0$$

- Grad－Shafranov 方程式の反磁性項は，磁束保存条件（FCT），すなわち，q(Ψ) 分布保存を拘束条件として設定する。

以下，iterationにより，C－H－T条件より定まるs－α図と一致するMHD平衡を算出し，β_c を決定する。



第１図　バルーニング不安定性に対する限界ベータ値の算出手順

3. バルーニング不安定性に対する限界ベータ値

JT－60 ダイバータ配位プラズマに関し，第2章に述べた手順により理想的MHDバルーニング不安定性に対する限界ベータ値（β_c）を求めた。以下で使用する各種パラメータは次の様に定義する。

$$\beta \equiv \frac{\int P(\Psi)\, dV(\Psi)}{B_o^2 / 2\mu_o}$$

$$\beta_J \equiv \frac{\int P(\Psi)\, dV(\Psi)}{B_p^2 / 2\mu_o} \quad , \quad B_p \equiv \frac{\mu_o I_p}{2\pi \bar{a}}$$

$$\bar{a} \equiv \sqrt{\frac{V(\Psi_s)}{2\pi^2 R_p}} \quad , \quad r_o \equiv \sqrt{\frac{V(\Psi)}{2\pi^2 R_p}}$$

$$s \equiv \frac{2V(\Psi)}{q(\Psi)} \frac{dq(\Psi)}{dV} = \frac{r_o}{q(\Psi)} \frac{dq(\Psi)}{dr_o}$$

$$\alpha \equiv -\frac{r_o}{2\pi^2} \frac{dV(\Psi)}{d\Psi} \frac{dP(\Psi)}{d\Psi} = -\frac{2R_p q^2(\Psi)}{B_o^2} \frac{dP(\Psi)}{dr_o}$$

$V(\Psi)$: 磁気面 Ψ の体積

B_o : $R = R_p$ に於けるトロイダル磁場

$q*$: $\Psi = \frac{1}{2}(\Psi_{axis} + \Psi_s)$ に於ける安全係数

$\frac{q* - q_o}{q_s - q_o}$: $q(\Psi)$ 分布を特徴づけるパラメータ

$\beta_c / \left(\frac{I_p \times 10^{-6}}{\bar{a} B_o}\right)$: Troyon 係数

3.1 $q_o = 1.0$

磁気軸での安全係数 $q_o = 1.0$ のケースの β_c を第1表及び第2図にまとめる。

結果をまとめると次の様になる。

(1) JT－60 に於ける β_c としては2％前後，Troyon 係数＝3～4 が期待できる。

(2) β_c 及び Troyon 係数は $q(\Psi)$ 分布に依存し，$q(\Psi)$ 分布が平坦な程両者は高くなる。この傾向は，Vabishchevich 等[4]の指摘と一致するが，絶対値は彼等の与えたスケーリング則と一致しない。

(3) 磁気リミタコイル電流及び四重極磁場コイル電流の組合せにより出来るダイバータ配位のバリエーションによる β_c の影響は，Troyon 係数にすると差がない。

(4) また，ダイバータ配位とリミタ配位とによる β_c の相違はない。

第1表　JT－60のバルーニング不安定性に対する限界ベータ値

I_p = 2.0 MA，B_T = 4.5 T @ R = 3.0m，q_o = 1.0

配　　位	ダ イ バ ー タ								リ ミ タ	
R_p（m）	3.15				3.10				3.115	
$\frac{q^*-q_o}{q_s-q_o}$	0.14	0.17	0.23	0.33	0.14	0.17	0.22	0.32	0.14	0.23
β_c（%）	2.35	2.23	2.07	1.82	2.24	2.11	1.97	1.71	2.27	1.99
$\beta_c / \frac{I_p \times 10^{-6}}{\bar{a} B_o}$	4.1	3.9	3.6	3.2	4.1	3.9	3.6	3.1	4.2	3.7
β_J	1.80	1.70	1.58	1.39	1.86	1.79	1.64	1.45	1.95	1.71
q_s	3.1	3.0	3.0	2.9	3.4	3.4	3.3	3.2	3.6	3.4
備　考	I_M/I_p = 0.063 I_Q/I_p = 0.0105 I_M：磁気リミタコイル電流 I_Q：四重極磁場コイル電流 第5図参照				I_M/I_p = 0.060 I_Q/I_p = 0.010 第6図参照				I_M/I_p = 0 I_Q/I_p = 0 第7図参照	

第3図及び第4図にダイバータ配位及びリミタ配位のβ_cに於ける（s－α）図を示す。第4図から明らかな様にダイバータ配位の場合（s－α）図上はBishop等[5]の指摘どおり同一のシアに対して∇Pの劣化は存在するが，一方高シアになりそこでの∇Pにより体積積分としてのβ（$\propto \int\int \nabla P \, dV \, dV$）には大きな影響は与えない。

第5図～第7図に各配位のβ_cに於けるMHD平衡状態を示す。

3.2　q_o = 1.5

JT－60 OH実験（I）に於けるダイバータ実験結果によると$q_o > 1$の放電が得られている[6]。そこで，$q_o > 1$に於けるバルーニング不安定性に対する限界ベータ値の一例としてq_o=1.5の場合についての計算結果を提示する。

第8図は，q_o = 1.5について第1図に示すiteration計算の過程及びその過程に於ける（s－α）図である。同図から次のことが言える。

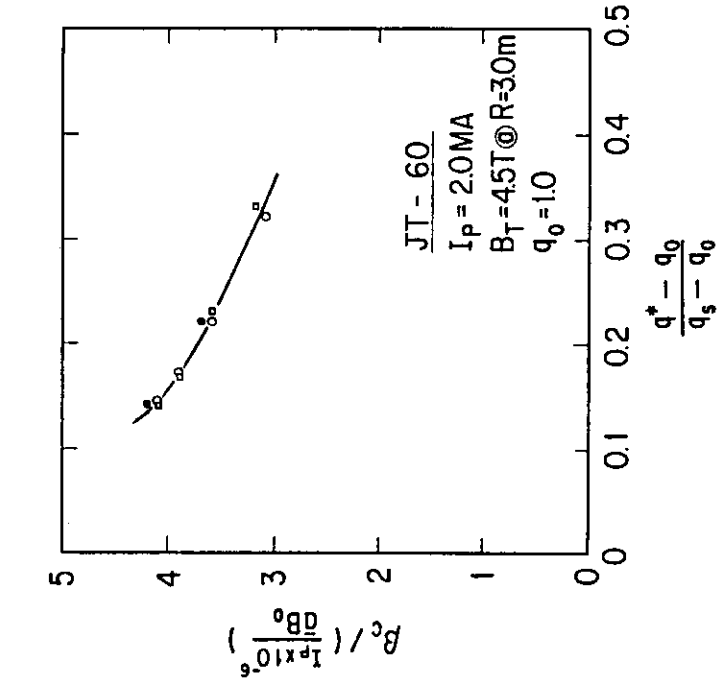
(1)　q_o = 1.5の場合，第1図に示すフローが収束しない。iteration計算の打切りは，C－H－T条件ではなく，MHD平衡計算の精度から決っている。

(2) 到達βは3％，Troyon係数は5.5になる。

(3) q_0＝1.0に比べて高ベータに至る理由は，（s－α）図より明かな様に，q_0＝1.5の場合低シアー部で局所的に第2安定領域に入り，圧力勾配が非常に大きくとれるためである（第3図と第8図を比較）。

この結果は，Vabishchevich等[4]の比例則$\beta_c \propto 1/q_0^{0.74}$とは逆の結果であり，高$q_0$ほどバルーニング不安定性に対する$\beta_c$は高くなることを示唆しており，sawtooth抑制のための積極的分布制御が高ベータ実現の有効的方法のひとつであると言える。JT－60OH(Ⅰ)実験では，ダイバータ配位により$q_0 > 1.0$の放電が得られているので，このq(Ψ)分布が加熱実験によりどの様に変化するか大きな関心である。

第9図にq_0＝1.5高ベータMHD平衡を示す。プラズマ電流分布がトーラス外側に局在しているので，低nモードのMHD安定性との共存が厳しいと予想される。今後，低nモードのMHD安定性解析とカップルしたバルーニング不安定性の限界ベータ値評価が急務である。



第2図(a)　JT－60のバルーニング不安定性に対する限界ベータ値 vs q(Ψ)分布 ($q_0 = 1.0$)

—○—：ダイバータ ($R_P = 3.10$ m)

—□—：ダイバータ ($R_P = 3.15$ m)

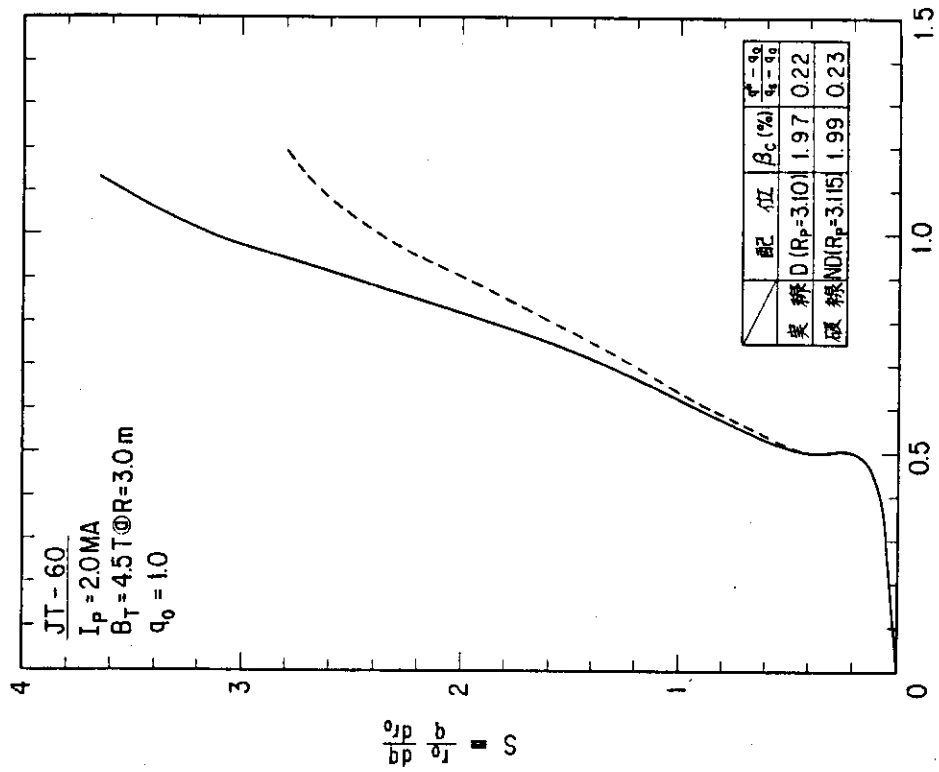
-·●·-：リミタ ($R_P = 3.115$ m)

第2図(b)　JT－60のバルーニング不安定性に対するTroyon係数 vs q(Ψ)分布 ($q_0 = 1.0$)

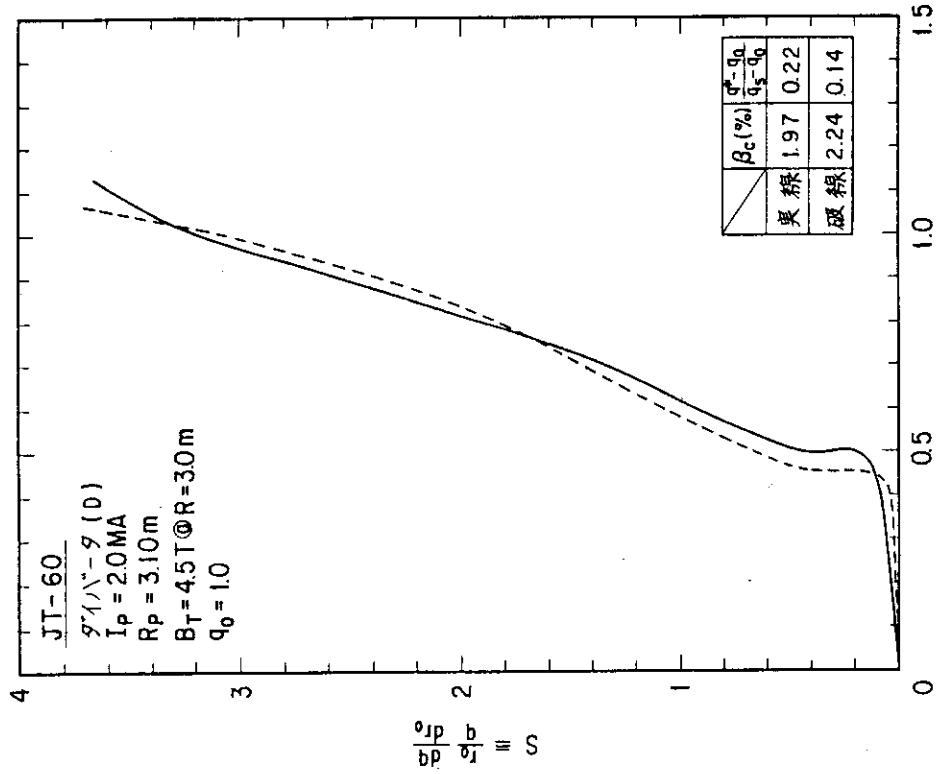
○：ダイバータ ($R_P = 3.10$ m)

□：ダイバータ ($R_P = 3.15$ m)

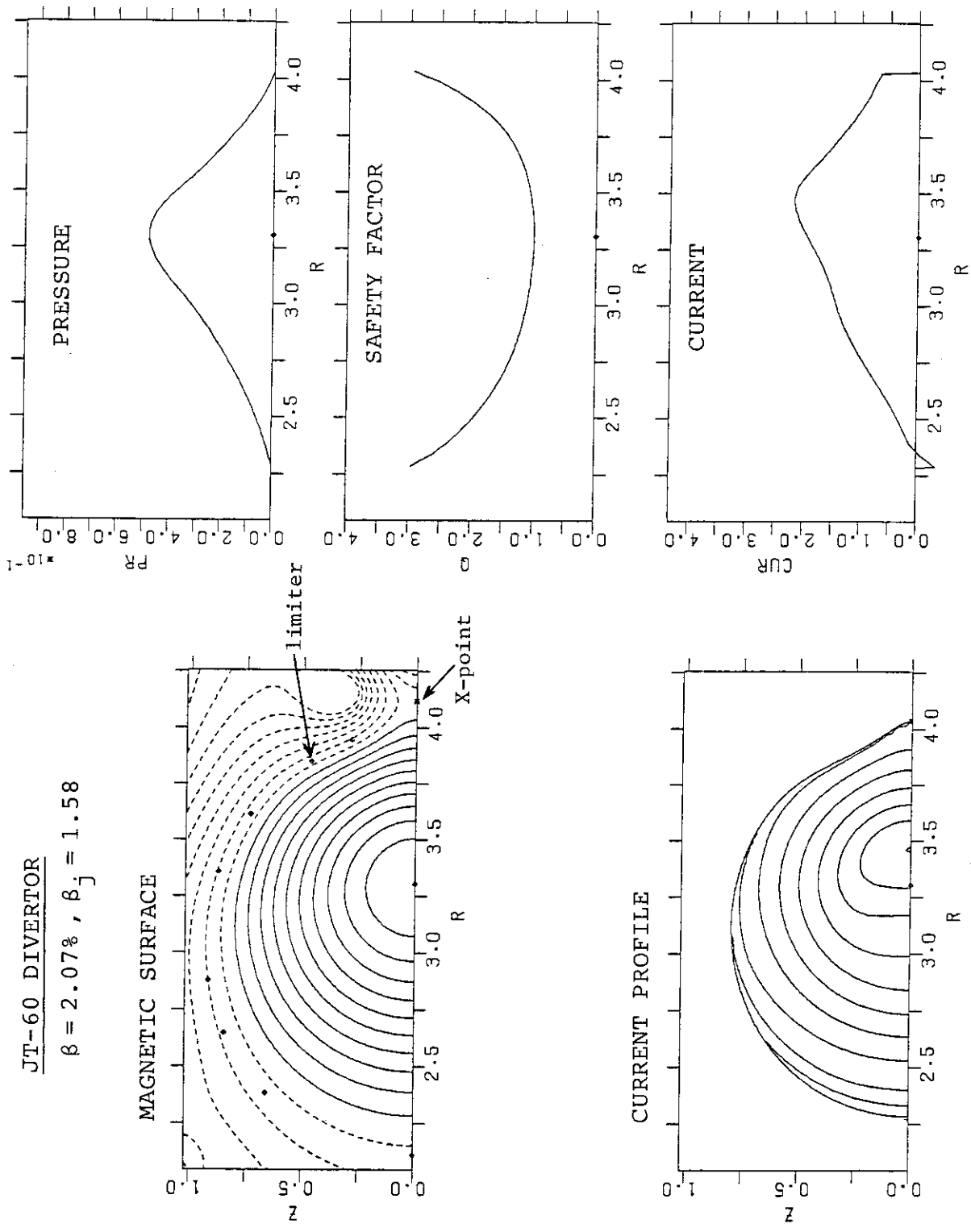
●：リミタ ($R_P = 3.115$ m)



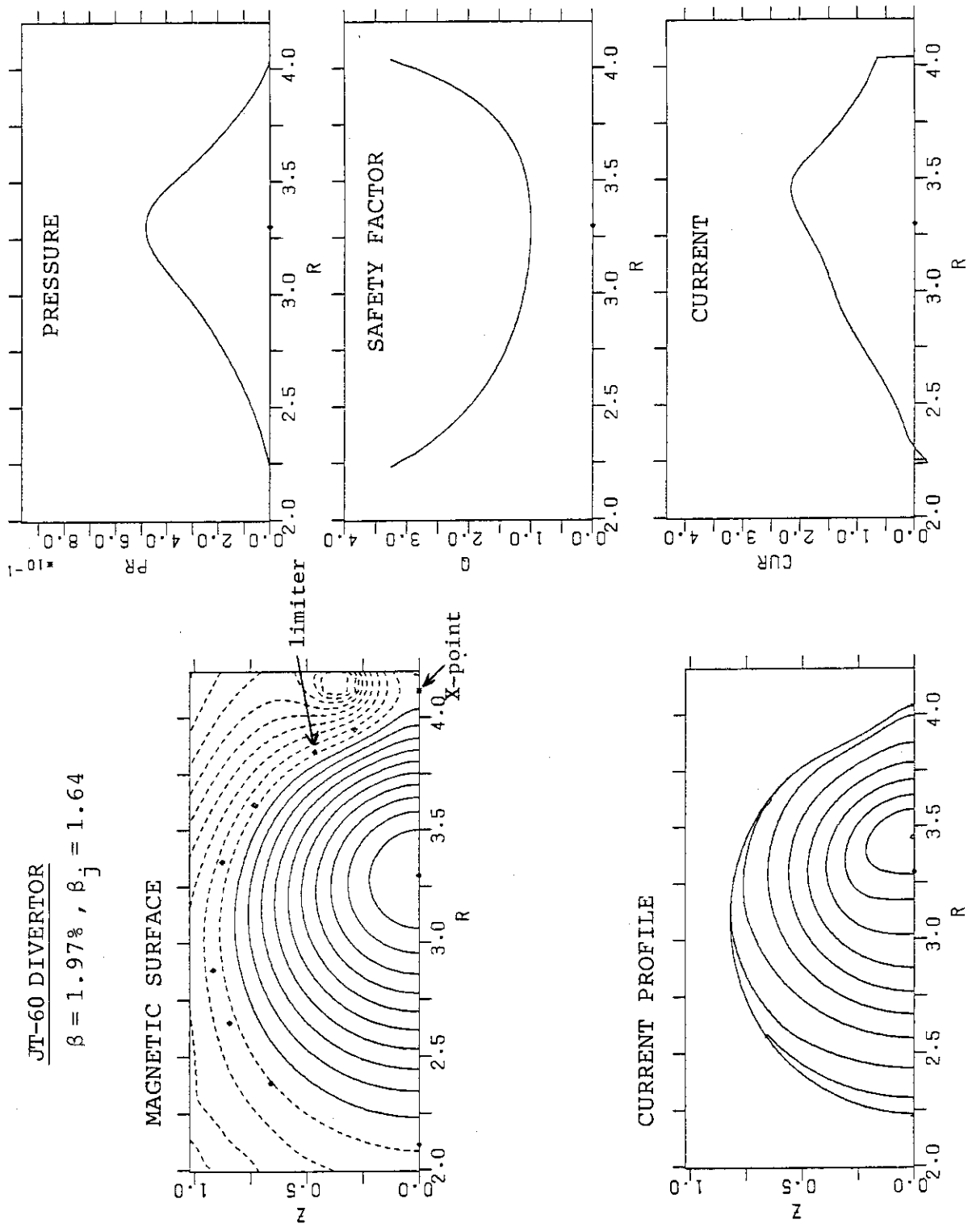
第4図　JT－60ダイバータ配位(D)及びリミタ配位(ND)の限界ベータに於けるシアーvs圧力勾配（$q_0 = 1.0$）



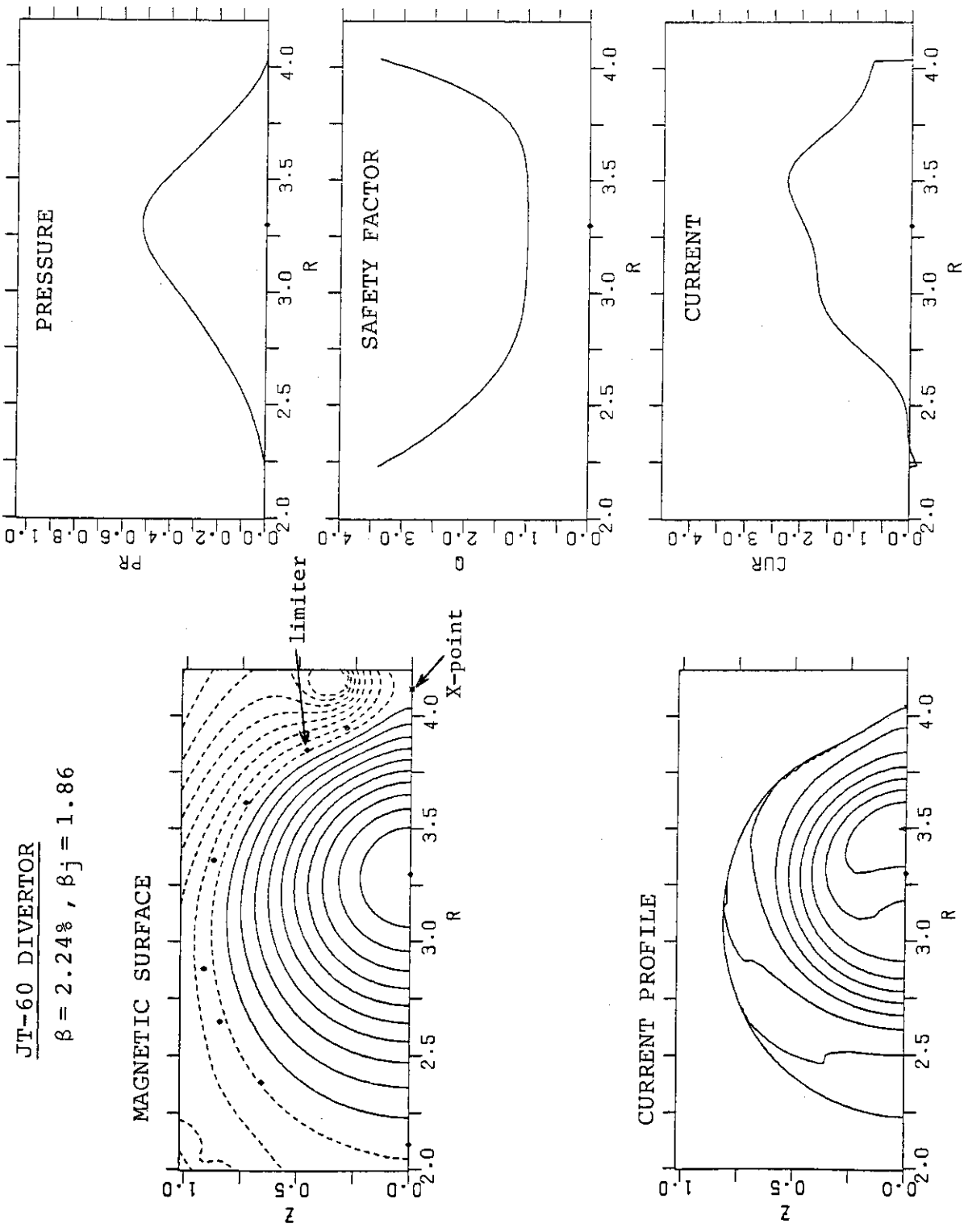
第3図　JT－60ダイバータ配位の限界ベータに於けるシアーvs圧力勾配（$q_0 = 1.0$）



第5図 JT－60高ベータ平衡（ダイバータ配位）
$\beta = 2.07\,\%$, $\beta_J = 1.58$
$I_P = 2.0\,\mathrm{MA}$, $B_T = 4.5\,\mathrm{T}$ @ $R = 3.0\,\mathrm{m}$, $R_P = 3.15\,\mathrm{m}$
$q_0 = 1.0$, $q^* - q_0 / q_s - q_0 = 0.23$



第6図(a)　JT－60 高ベータ平衡（ダイバータ配位）
$\beta = 1.97\,\%$，$\beta_J = 1.64$
$I_P = 2.0\,MA$，$B_T = 4.5\,T$ @ $R = 3.0\,m$，$R_P = 3.10\,m$
$q_0 = 1.0$，$q^* - q_0 / q_s - q_0 = 0.22$

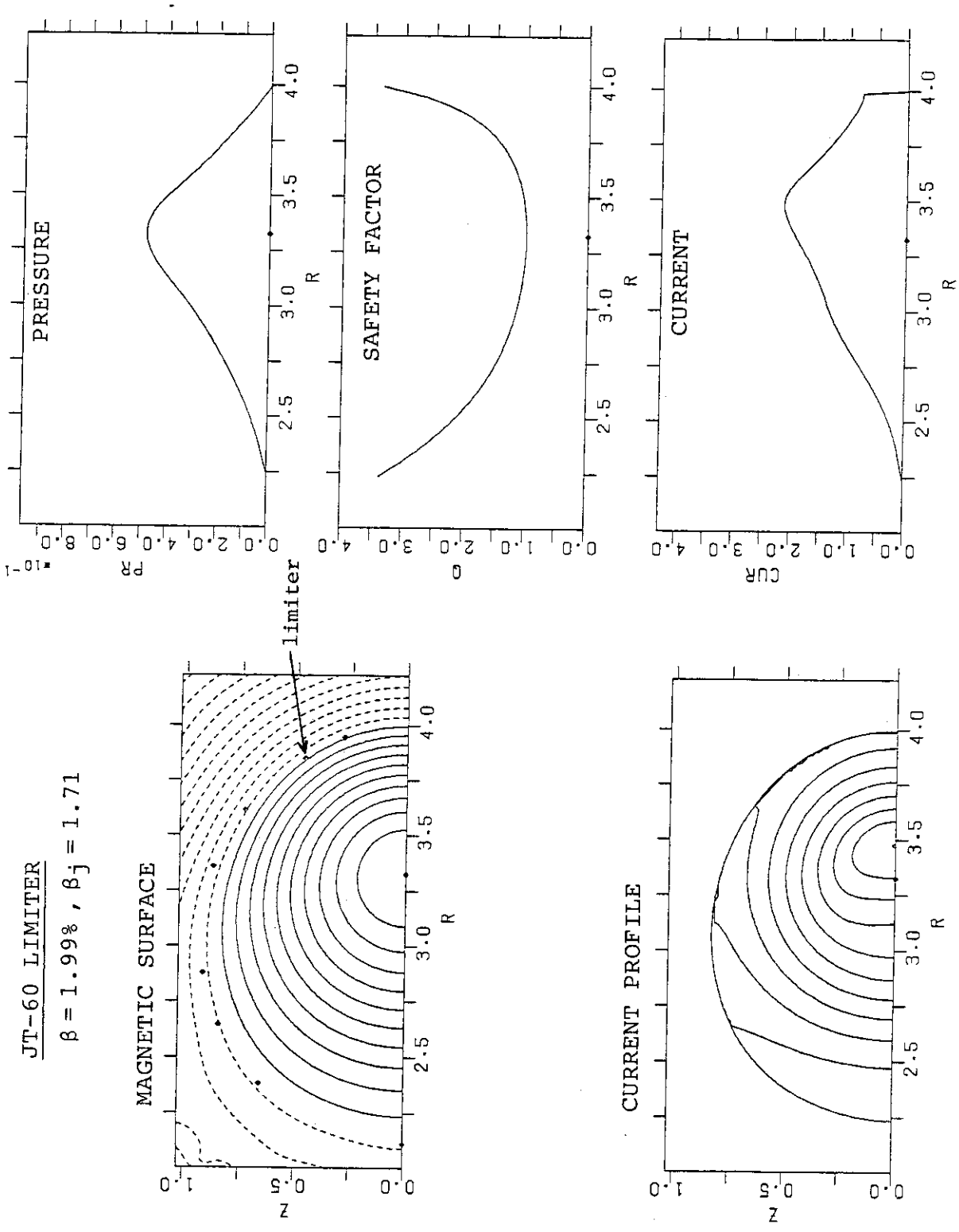


第6図(b)　JT－60 高ベータ平衡（ダイバータ配位）

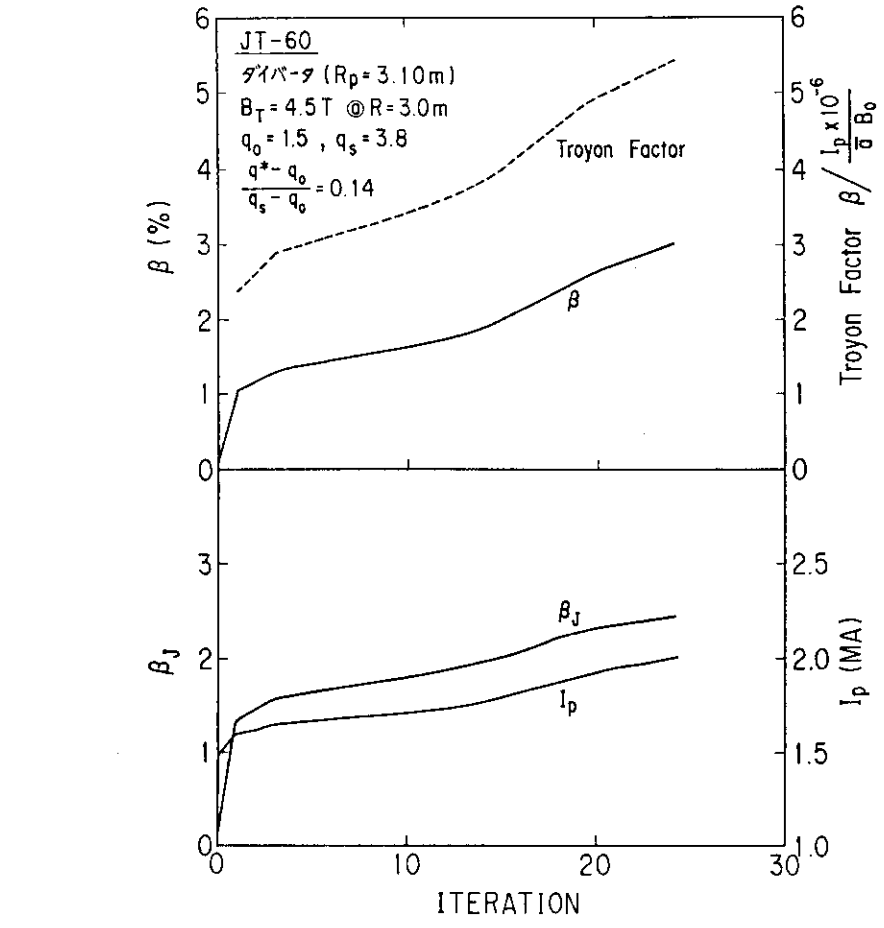
$\beta = 2.24\,\%$,　$\beta_J = 1.86$

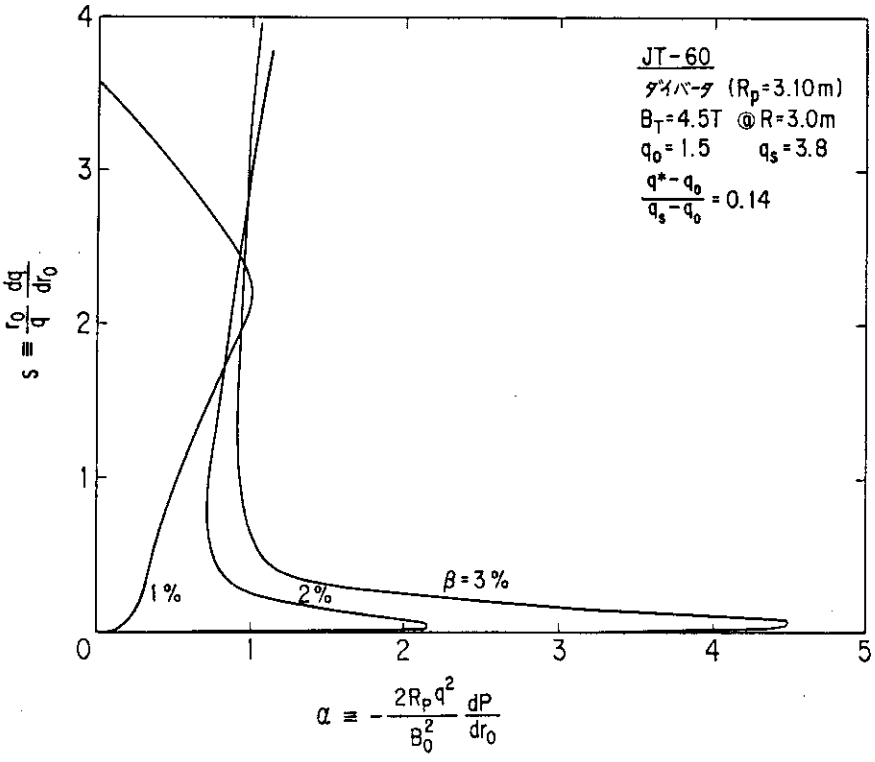
$I_P = 2.0\,\mathrm{MA}$,　$B_T = 4.5\,\mathrm{T}$ @ $R = 3.0\,\mathrm{m}$,　$R_P = 3.10\,\mathrm{m}$

$q_0 = 1.0$,　$q^* - q_0 / q_s - q_0 = 0.14$



第7図　JT－60 高ベータ平衡（リミタ配位）
$\beta = 1.99\,\%$，$\beta_J = 1.71$
$I_P = 2.0\,MA$，$B_T = 4.5\,T$ @ $R = 3.0\,m$，$R_P = 3.115\,m$
$q_0 = 1.0$，$q^* - q_0 / q_s - q_0 = 0.23$

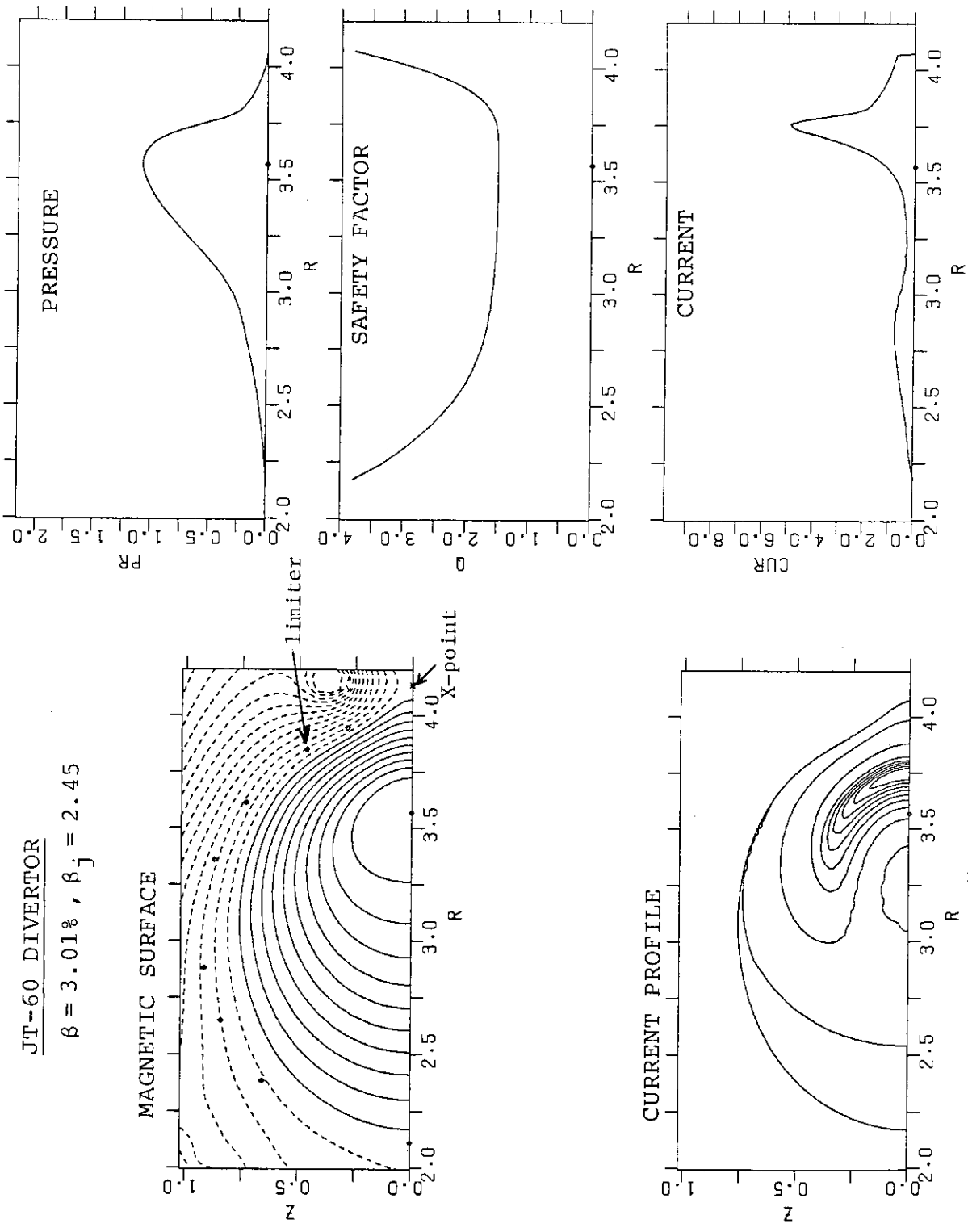




第８図　JT－60 ダイバータ配位，$q_0 = 1.5$ に於けるバルーニング不安定性に対する限界ベータ値 $(q^* - q_0 / q_s - q_0 = 0.14)$。

(a) iteration の過程

(b) $(s - \alpha)$ 図



第9図　JT－60高ベータ平衡（ダイバータ配位）
$\beta = 3.01\,\%$，$\beta_J = 2.45$
$I_P = 2.0\,MA$，$B_T = 4.5\,T$ @$R = 3.0\,m$，$R_P = 3.10\,m$
$q_O = 1.5$，$q_S = 3.8$，$q^* - q_O / q_S - q_O = 0.14$

4. ま と め

JT－60プラズマの理想的MHDバルーニング不安定性に対する限界ベータ値（β_c）を，ダイバータ配位に重点を置いて調べた。結果をまとめると次の様になる。

(1) β_cは，q_0及び$q(\Psi)$分布に強く依存する。

(2) $q_0 = 1.0$の場合，$\beta_c = 2\%$，Troyon係数～3.5である。

(3) この場合，ダイバータ配位（ie セパラトリックスの存在）による（$s-\alpha$）図上の∇Pの劣化はBishop等[5]の指摘どおり存在するが，その劣化分は高シアにより補われ結果としてβ_cへの影響はほとんどない。

(4) $q_0 = 1.5$の場合，$\beta_c \gtrsim 3\%$，Troyon係数$\gtrsim 5.5$が期待できる。すなわち，β_cのq_0依存性はVabishchevich等[4]の報告と大きく異なる。

(5) $q(\Psi)$分布制御，特に$q_0 \gtrsim 1.5$の実現は，JT－60実験での高ベータプラズマ達成のための有望な手段である。

以上の結果に対し今後低nモードのMHD安定性の解析を行い，最終的なJT－60の限界ベータ値を明確にしていく予定である。

本報告のまとめにあたり，下村安夫主任研究員，常松俊秀副主任研究員から有益な御助言・御議録を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) F. Troyon et al. : Plasma Phys. Controlled Fusion 26 (1984) 209

2) F. Troyon, R. Gruber : Phys. Letts. 110A (1985) 29

3) J.W. Connor, R.J. Hastie, J.B. Taylor : Phys. Rev. Letts. 40 (1978) 396

4) P.N. Vabishchevich et al. : Sov. J. Plasma Phys. 9 (1983) 100

5) C.M. Bishop et al. : Nucl. Fusion 24 (1984) 1579

6) JT-60 Team : Proc. 12th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. (Budapest, 1985) Part 1 p.375

4. ま と め

JT－60プラズマの理想的MHDバルーニング不安定性に対する限界ベータ値（β_c）を，ダイバータ配位に重点を置いて調べた。結果をまとめると次の様になる。

(1) β_c は，q_o 及び $q(\Psi)$ 分布に強く依存する。

(2) $q_o = 1.0$ の場合，$\beta_c = 2\%$，Troyon 係数～3.5 である。

(3) この場合，ダイバータ配位（ie セパラトリックスの存在）による（$s-\alpha$）図上の∇Pの劣化はBishop等[5]の指摘どおり存在するが，その劣化分は高シアにより補われ結果として β_c への影響はほとんどない。

(4) $q_o = 1.5$ の場合，$\beta_c \gtrsim 3\%$，Troyon 係数 $\gtrsim 5.5$ が期待できる。すなわち，β_c の q_o 依存性はVabishchevich等[4]の報告と大きく異なる。

(5) $q(\Psi)$ 分布制御，特に $q_o \gtrsim 1.5$ の実現は，JT－60実験での高ベータプラズマ達成のための有望な手段である。

以上の結果に対し今後低nモードのMHD安定性の解析を行い，最終的なJT－60の限界ベータ値を明確にしていく予定である。

本報告のまとめにあたり，下村安夫主任研究員，常松俊秀副主任研究員から有益な御助言・御議録を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) F. Troyon et al. : Plasma Phys. Controlled Fusion 26 (1984) 209

2) F. Troyon, R. Gruber : Phys. Letts. 110A (1985) 29

3) J.W. Connor, R.J. Hastie, J.B. Taylor : Phys. Rev. Letts. 40 (1978) 396

4) P.N. Vabishchevich et al. : Sov. J. Plasma Phys. 9 (1983) 100

5) C.M. Bishop et al. : Nucl. Fusion 24 (1984) 1579

6) JT-60 Team : Proc. 12th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. (Budapest, 1985) Part 1 p.375

Appendix　Connor－Hastie－Taylor 条件の算出

成長率零の n＝∞バルーニング・モード方程式は次式で与えられる。[3)]

$$\frac{1}{J}\frac{d}{d\theta}\left(f\frac{d\tilde{\phi}}{d\theta}\right)+\lambda g\tilde{\phi}=0$$

$$f=\frac{1}{JR^2B_p^2}\left[1+\left(\frac{R^2B_p^2}{B}\zeta\right)^2\right]$$

$$g=\frac{1}{B^2}\frac{dP}{d\Psi}\left[\frac{\partial}{\partial\Psi}(2P+B^2)-\frac{RB_T}{JB^2}\zeta\frac{\partial B^2}{\partial\theta}\right]$$

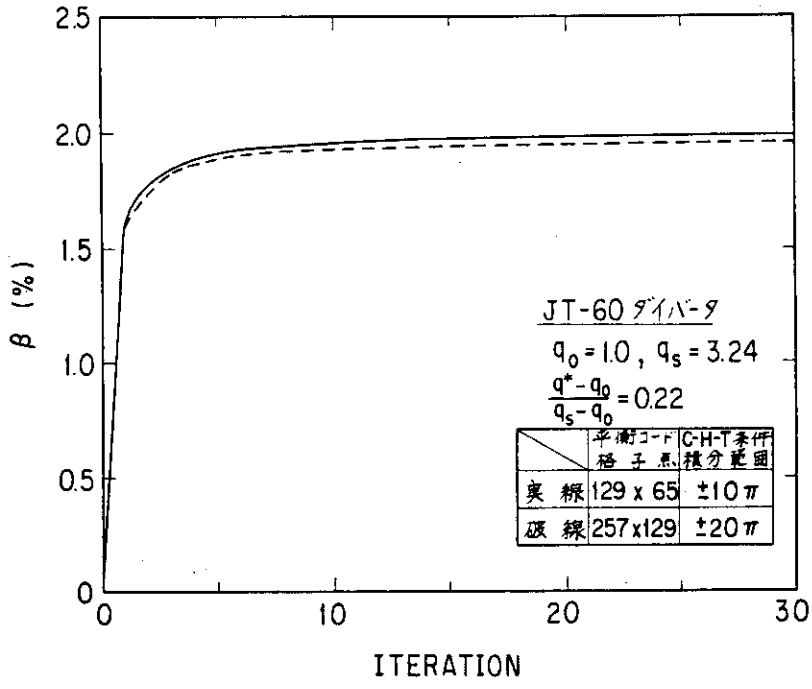
$$\zeta=\int_0^{\chi}d\chi\frac{\partial}{\partial\Psi}\left(\frac{JB_T}{R}\right)$$

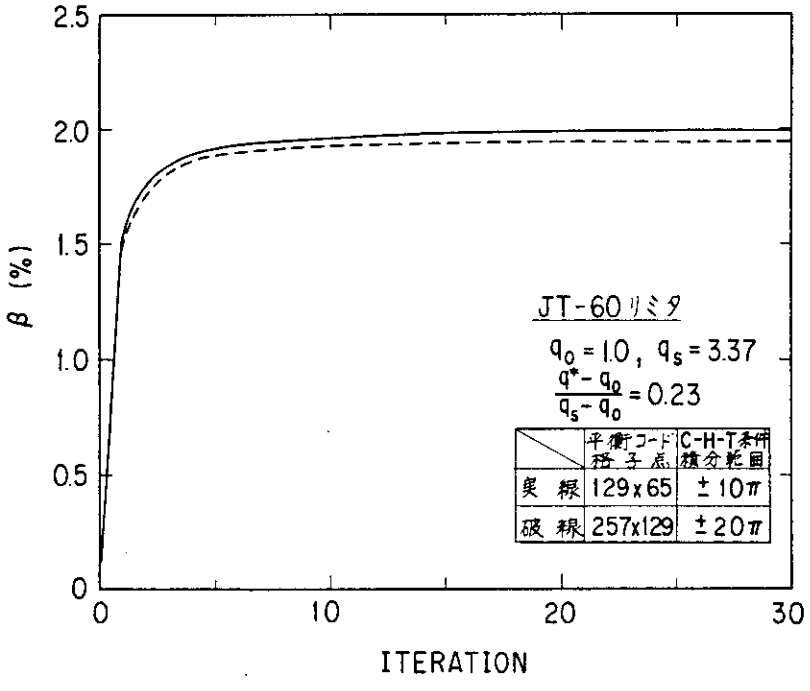
ここでθはポロイダル角，Jはヤコビアンである。この方程式を$\frac{\partial\tilde{\phi}}{\partial\chi}(\theta=0)=0$及び$\tilde{\phi}(\theta=\theta_{max})=0$の境界条件のもとで$\lambda$を固有値として解く。固有値$\lambda<1$が不安定に対応しており，圧力勾配の限界値$\left(\frac{dP}{d\Psi}\right)_c$は，$\lambda\frac{dP}{d\Psi}$で与えられる。

上式の評価精度は，MHD平衡算出精度及び上式の積分領域に依存する。本報告では，計算時間節約のため第2章に記した条件でC－H－T条件を評価したが，その精度確認のために以下の条件での結果と比較を行った。

	本文中の条件	確認条件
MHD平衡算出時の格子点　（R，Z）	129 × 65	257 × 129
C－H－T条件算出時の格子点　（Ψ，θ）	21 × 51	51 × 51
C－H－T条件算出時の積分領域	± 10 π	± 20 π

結果は図－Aに示す様に，β_c収束値にわずかな差が出るが，β_c算出精度上問題となる量ではない。また（s－α）図としては，第3図及び第4図と曲線の太さの程度のばらつきで両条件の計算結果は一致する。


2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0
β (%)
0
10
20
30
ITERATION
JT-60 ダイバータ
$q_0 = 1.0$, $q_s = 3.24$
$\frac{q^* - q_0}{q_s - q_0} = 0.22$
平衡コード 格子点
C-H-T条件 積分範囲
奥 線 129 x 65 ±10π
破 線 257x129 ±20π


2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0
β (%)
0
10
20
30
ITERATION
JT-60 リミタ
$q_0 = 1.0$, $q_s = 3.37$
$\frac{q^* - q_0}{q_s - q_0} = 0.23$
平衡コード 格子点
C-H-T条件 積分範囲
奥 線 129x65 ±10π
破 線 257x129 ±20π

図－A