

JAERI-M

6026

自由境界MHD平衡の計算コード
「NIRVANA」

1975年3月

三宮 博正・鈴木 康夫・亀有 昭久*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

自由境界MHD平衡の計算コード「NIRVANA」

日本原子力研究所東海研究所核融合研究室

二宮博正，鈴木康夫，亀有昭久*

(1975年2月8日受理)

自由境界値問題としての平衡方程式を解く計算方法およびその計算コード「NIRVANA」を開発したのでここに報告する。この方法は、磁場の流れ函数 ψ よりプラズマ電流を求めて線電流化し、円形線電流近似を用いて積分方程式になおし、逐次近似法を用いて解を求める方法である。この方法によって、プラズマ表面とセパトリックスを含む面を一致させて、自己撞着なく平衡を解くことが可能なだけでなく、円形、非円形をとわず他の各種のシェルレストカマクの平衡計算に適用できる。また各種平衡用コイル系とプラズマ特性位置、断面形状等の関係を研究することができる。

* 外来研究員： 三菱原子力工業大宮研究所

JAERI-M 6026

Calculation Code NIRVANA for Free Boundary MHD Equilibrium

Hiromasa NINOMIYA, Yasuo SUZUKI and Akihisa KAMEARI*

Thermonuclear Fusion Laboratory, Tokai, JAERI

(Received February 8, 1975)

The calculation method and code of solving the free boundary problem for MHD equilibrium has been developed. Usage of the code "NIRVANA" is described. The toroidal plasma current density determined as a function of the flux function Ψ is substituted by a group of the ring currents, whereby the equation of MHD equilibrium is transformed into an integral equation. Either of the two iterative methods is chosen to solve the integral equation, depending on the assumptions made of the plasma surface points. Calculation of the magnetic field configurations is possible when the plasma surface coincides self-consistently with the magnetic flux including the separatrix points. The code is usable in calculation of the circular or non-circular shell-less Tokamak equilibrium.

* On leave of absence from Mitsubishi Atomic Power
Industries Inc..

目 次

1	はじめに	1
2	計算方法	1
2.1	基礎方程式	1
2.2	計算方法	2
3	計算コードの概要	2
3.1	電流分布の設定	2
3.2	外部垂直磁場分布と初期値の設定	3
3.3	$\psi_{p,s}$ の決定	4
3.4	ψ_p^{n+1} の計算	4
3.5	逐次近似の方法と収束の判定	4
3.6	メッシュの自動増倍	5
3.7	平衡量の計算	5
3.8	結果のチェック	6
4	コードの使用方法	6
4.1	入力形式およびその内容	6
4.2	初期値の設定と収束速度および精度の関係	8
4.3	アウトプットの例	9
5	おわりに	9
6	参考文献	9
	付録	10

1 はじめに

軸対称トロイダルのプラズマ平衡は垂直磁場により得られ、この磁場はシェルに誘起されるイメージ電流および外部導体中の電流により作られる。しかしながら最近提案されている大型トカマク装置においては、閉じ込め時間が永いためにシェルによる方法は使えず、外部導体により垂直磁場を作るいわゆる“シェルレストカマク”となる。臨界プラズマ試験装置(JT-60)の平衡用コイル系の設計にあたって、このシェル効果のない場合のプラズマ平衡配位を計算することが必要である。そこでその様な“シェルレストカマク”のプラズマ平衡問題を解くために、自由境界のもとでのMHD平衡計算コード「NIRVANA」を開発したのでここに報告する。

本コードの特徴は、(1)真空領域とプラズマ領域を一括して解ける。(2)外部導体電流による磁場を任意に入れることができる。(3)プラズマ中の電流分布を任意に選ぶことができる。(4)磁気リミッターをもつ装置に適用できる(セパトリックスを含む面とプラズマ表面とを一致させる条件で計算できる)。などであり、円形、非円形をとわず他のトロイダル・プラズマの計算に広く応用することができる。なお、本レポートは計算方法とコードの説明のみを行ない、計算結果、討論は文献1に述べる。

2 計算方法

2.1 基礎方程式

軸対称トロイダル・プラズマの平衡磁場分布は、磁場の流れ関数 ψ を用いて次の方程式で記述される。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} + f(R, \psi) = 0 \quad (2.1)$$

$$f(R, \psi) = \mu_0 R j_\phi \quad (2.2)$$

$$j_\phi = R \frac{dP}{d\psi} + \frac{1}{R} \frac{dI^2}{d\psi} \quad (2.3)$$

ただし座標系は円柱座標 (R, ϕ, Z) であり、 P はプラズマ圧力、 I はトロイダル電流の流れ関数、 j_ϕ はプラズマ中のトロイダル電流密度である。磁場及び電流は、この ψ および I を用いて次のように表わされる。

$$B_R = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Z}, \quad B_\phi = \frac{\mu_0}{R} I, \quad B_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R}$$

$$j_R = -\frac{1}{R} \frac{\partial I}{\partial Z}, \quad j_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial I}{\partial R} \quad (2.4)$$

いま ψ を

$$\psi = \psi_p + \psi_e \quad (2.5)$$

1 はじめに

軸対称トロイダルのプラズマ平衡は垂直磁場により得られ、この磁場はシェルに誘起されるイメージ電流および外部導体中の電流により作られる。しかしながら最近提案されている大型トカマク装置においては、閉じ込め時間が永いためにシェルによる方法は使えず、外部導体により垂直磁場を作るいわゆる“シェルレストカマク”となる。臨界プラズマ試験装置(JT-60)の平衡用コイル系の設計にあたって、このシェル効果のない場合のプラズマ平衡配位を計算することが必要である。そこでその様な“シェルレストカマク”のプラズマ平衡問題を解くために、自由境界のもとでのMHD平衡計算コード「NIRVANA」を開発したのでここに報告する。

本コードの特徴は、(1)真空領域とプラズマ領域を一括して解ける。(2)外部導体電流による磁場を任意に入れることができる。(3)プラズマ中の電流分布を任意に選ぶことができる。(4)磁気リミッターをもつ装置に適用できる(セパトリックスを含む面とプラズマ表面とを一致させる条件で計算できる)。などであり、円形、非円形をとわず他のトロイダル・プラズマの計算に広く応用することができる。なお、本レポートは計算方法とコードの説明のみを行ない、計算結果、討論は文献1に述べる。

2 計算方法

2.1 基礎方程式

軸対称トロイダル・プラズマの平衡磁場分布は、磁場の流れ関数 ψ を用いて次の方程式で記述される。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} + f(R, \psi) = 0 \quad (2.1)$$

$$f(R, \psi) = \mu_0 R j_\phi \quad (2.2)$$

$$j_\phi = R \frac{dP}{d\psi} + \frac{1}{R} \frac{dI^2}{d\psi} \quad (2.3)$$

ただし座標系は円柱座標 (R, ϕ, Z) であり、 P はプラズマ圧力、 I はトロイダル電流の流れ関数、 j_ϕ はプラズマ中のトロイダル電流密度である。磁場及び電流は、この ψ および I を用いて次のように表わされる。

$$B_R = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Z}, \quad B_\phi = \frac{\mu_0}{R} I, \quad B_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R}$$

$$j_R = -\frac{1}{R} \frac{\partial I}{\partial Z}, \quad j_Z = \frac{1}{R} \frac{\partial I}{\partial R} \quad (2.4)$$

いま ψ を

$$\psi = \psi_p + \psi_e \quad (2.5)$$

と表わす。ここで ψ_p はプラズマ電流による磁場の流れ函数、 ψ_e は外部導体に流れる電流による磁場の流れ函数を意味する。(2.1)式は(2.5)式を用いて次のように表わせる。

$$L\psi_p + S(\psi_p + \psi_e) f(R, \psi_p + \psi_e) = 0 \quad (2.6)$$

ただし

$$L = \frac{\partial^2}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$$

$$S(\psi) = \begin{cases} 1; & \psi \geq \psi_s \\ 0; & \psi < \psi_s \end{cases}$$

また ψ_s はプラズマ表面での磁場の流れ函数の値である。

2.2 計算方法

(2.6)式は自由境界値問題の非線形2階偏微分方程式である。そこで我々は、(2.6)式をグリーン函数を含んだ積分方程式に変形し、初期値を与え、それより逐次近次を用いて解を求める方法を用いる。すなわち次の方程式を解く。

$$\psi_p^{n+1} = L^{-1} S(\psi^n - \psi_s^n) f(R', \psi^n - \psi_s^n) \quad (2.7)$$

ただし

$$L^{-1} = \int G(R, Z; R', Z') dR' dZ'$$

$$G(R, Z; R', Z') = \frac{1}{\pi k} \sqrt{\frac{R'}{R}} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\}$$

$$k^2 = \frac{4RR'}{(R+R')^2 + (Z-Z')^2}$$

ここで $K(k)$, $E(k)$ はそれぞれ第1種, 第2種の完全楕円積分である。

3 計算コードの概要

計算コードの大まかなフローチャートを図1に示す。以下にこのフローチャートに沿ってコードの概要を述べる。

3.1 電流分布の設定

プラズマの電流分布は、フラットな場合とパラボリックな場合の2通りをオプション(IPROFL)で選ぶ。

1) パラボリックな場合 (IPROFL=1)

$$j_T = R\lambda\psi + \frac{1}{R}\mu\psi$$

において λ , μ を与える。ただし λ は入力値を与え、 μ は直円筒プラズマでのフラット電流分布のときの β_p , λ , μ の関係式

と表わす。ここで ψ_p はプラズマ電流による磁場の流れ函数、 ψ_e は外部導体に流れる電流による磁場の流れ函数を意味する。(2.1)式は(2.5)式を用いて次のように表わせる。

$$L\psi_p + S(\psi_p + \psi_e) f(R, \psi_p + \psi_e) = 0 \quad (2.6)$$

ただし

$$L = \frac{\partial^2}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$$

$$S(\psi) = \begin{cases} 1; & \psi \geq \psi_s \\ 0; & \psi < \psi_s \end{cases}$$

また ψ_s はプラズマ表面での磁場の流れ函数の値である。

2.2 計算方法

(2.6)式は自由境界値問題の非線形2階偏微分方程式である。そこで我々は、(2.6)式をグリーン函数を含んだ積分方程式に変形し、初期値を与え、それより逐次近次を用いて解を求める方法を用いる。すなわち次の方程式を解く。

$$\psi_p^{n+1} = L^{-1} S(\psi^n - \psi_s^n) f(R', \psi^n - \psi_s^n) \quad (2.7)$$

ただし

$$L^{-1} = \int G(R, Z; R', Z') dR' dZ'$$

$$G(R, Z; R', Z') = \frac{1}{\pi k} \sqrt{\frac{R'}{R}} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\}$$

$$k^2 = \frac{4RR'}{(R+R')^2 + (Z-Z')^2}$$

ここで $K(k)$, $E(k)$ はそれぞれ第1種, 第2種の完全楕円積分である。

3 計算コードの概要

計算コードの大まかなフローチャートを図1に示す。以下にこのフローチャートに沿ってコードの概要を述べる。

3.1 電流分布の設定

プラズマの電流分布は、フラットな場合とパラボリックな場合の2通りをオプション(IPROFL)で選ぶ。

1) パラボリックな場合 (IPROFL=1)

$$j_T = R\lambda\psi + \frac{1}{R} - \mu\psi$$

において λ , μ を与える。ただし λ は入力値を与え、 μ は直円筒プラズマでのフラット電流分布のときの β_p , λ , μ の関係式

$$\mu = \frac{\lambda R_0}{\beta_p} \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 - a^2}}{2} (1 - \beta_p)$$

より求める。ここで R_0 はプラズマ中心の位置， \bar{a} はプラズマの平均半径であり，結果の β_p は入力 β_p と近い値になる。

2) フラットな場合 (IPRO FL=2)

$$j_T = R\lambda + \frac{\mu}{R}$$

において λ ， μ を次のように与える。

$$\lambda = \frac{\mu_0 I_p}{\pi a^2} \frac{\beta_p}{R_0}$$

$$\mu = \frac{\mu_0 I_p}{\pi a^2} \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 - a^2}}{2} (1 - \beta_p)$$

本コードにはこの2つの場合しかかれていないが，他の任意の電流分布の使用も容易にできる。

3.2 外部垂直磁場分布と初期値の設定

外部垂直磁場分布はオプション (NC) により次の3通りの場合を与えることができる。

1) 一様垂直磁場の場合 (NC=0)

2) 外部導体電流により外部垂直磁場が与えられる場合 (磁気リミッターコイル，制御用コイルも含む。NC=1)

3) 一様垂直磁場に外部導体電流による垂直磁場が加わった場合 (NC=2)

また本コードでは ψ_p の初期値を設定しなければならない。この初期値の設定もオプション (NINIT) により次の3通りの場合を与えることができる。

1) NINIT=0

プラズマ中心の位置を R_p ，その点の垂直磁場の大きさを $B_{\perp 0}$ とおくと，

$$B_{\perp 0} = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R_p} \left(\ell_n \frac{8R_p}{a} + \lambda - \frac{1}{2} \right) \quad (3.1)$$

の式が成り立つ。従って，プラズマを円と考えると，内点固定 (次節参照) の場合は $R_p - a = \text{const}$ (固定点の座標)，外部点固定の場合は $R_p + a = \text{const}$ ，となり，これらの関係を (3.1) 式に代入し解くことによりプラズマ中心の大体の位置 R_p を求めることができる。そこでその点に I_p の電流を流すことにより得られる ψ を ψ_p^0 とおく。

2) NINIT=1

ある任意の1点に I_p の電流を流すことにより得られる ψ を ψ_p^0 とおく。

3) NINIT=2

$$\psi_p^0 = \rho^2 (1 - \varepsilon_2 \cos 2\theta) - \frac{\varepsilon_3}{a} \rho^3 \cos 3\theta - a^2$$

$$\rho^2 = (R_p - R)^2 + (Z_p - Z)^2$$

で ψ_p^0 を与える。ただし (R_p, Z_p) はプラズマ中心の位置， (R, Z) は各メッシュの座標，

ϵ_2, ϵ_3 は非円形にする場合の円形からのずれを示す係数である。

3.3 $\psi_{p,s}$ の決定

本コードでは、プラズマ表面の磁場の流れ函数 $\psi_{p,s}$ を決めなければならない。そこで本コードは次の3通りの場合を考えた(図2-4参照)

- 1) 基準面内側の1点を固定して、その点を通る等磁束面をプラズマ表面とする(内点固定)。
- 2) 基準面外側の1点を固定する方法(外点固定)。
- 3) 磁気リミッターがある場合には位置を固定せず、セパトリックスを含む等磁束面をプラズマ表面とする(セパトリックス固定)。

以上に述べた方法以外による $\psi_{p,s}$ 決定の方法も、容易に本コードにくみこむことができる。

3.4 ψ_p^{n+1} の計算

各メッシュ点 (R_i, Z_j) の $\psi_{p,ij}^n$ より、プラズマ電流 $j_{T,ij}$ を求め、(2.7)式を用いて $\psi_{p,ij}^{n+1}$ を求める。プラズマ電流 I_p が一定という条件の場合は $I_p' = \sum_{i,j} j_{T,ij}$ を求め、 $\alpha = I_p / I_p'$ より $\lambda' = \alpha \lambda, \mu' = \alpha \mu, I_p = I_p' \alpha = \sum_{i,j} j_{T,ij}' = \sum_{i,j} \alpha j_{T,ij}$ とおきなおして、(2.7)式を用いる。

また(2.7)式の計算において、 $\psi_{p,ij}^n$ と $j_{T,km}$ のメッシュ点一致した場合、第1種楕円積分 $K(k)$ は発散する。そこでこの発散を避けるため、その点のまわりではプラズマ電流は一様分布であるとして、次の近似式を用いる。

$$\psi_{p,ij}^{n+1} = \frac{\mu_0 j_{T,ij}}{2\pi} \left(\ell_n \frac{8R}{b} - \frac{3}{2} \right) \quad (3.2)$$

ただし b はメッシュ間の巾である。またこの近似式を用いるため、本コードにおいては正方形、又は正方形に近いメッシュを設定しなければならない。

また計算時間を短くするため、楕円積分の引数 k が $0.5 \sim 0.985$ のものについては $\mu_0 \{ (1 - k^2/2) K(k) - E(k) \} / k$ の値がディスクに保存されている。

3.5 逐次近似の方法と収束の判定

j_T 分布より求められた ψ_p^{n+1} が ψ_p^n と一致したならば、 ψ_p^{n+1} は(2.6)式の解である。そこで、真空領域を除いた全メッシュ点で

$$\text{Norm} = \left| \frac{\psi_p^{n+1} - \psi_p^n}{\psi_p^n} \right| < \epsilon \quad (3.3)$$

が満足することを収束判定条件としている。

もし、(3.3)式の収束条件が満足されないときには、3.4節に述べた方法を繰り返す(単純逐次近似法)。一般の場合はこの単純逐次近似法で収束するが、セパトリックス固定の場合で収束しない場合もある(詳細は文献1)。そのような場合は3段階逐次近似法を用いて平衡解を求める(文献2, 3.4)。この3段階逐次近似法は、(2.7)式によって、 ψ_p^n より $\psi_p^{n+1/3}$ 、 $\psi_p^{n+1/3}$ より $\psi_p^{n+2/3}$ を求め、それから ψ_p^{n+1} を

$$\psi_p^{n+1} = (1-G)\psi_p^n + 2G\psi_p^{n+\frac{1}{3}} - G\psi_p^{n+\frac{2}{3}} \quad (G \text{ は 任意定数})$$

と合成する方法である。

また本コードにおいては逐次近似による収束を早めるために、収束の加速を行なっている。これは収束がある一定値になめらかに進むと仮定し（ある程度返復計算が行なわれた時、この仮定は成立する）、すでに求めた ψ^n, ψ^{n+1} より直線近似を用いて

$$\psi^{n+1'} = \psi^{n+1} + G_a(\psi^{n+1} - \psi^n)$$

と $\psi^{n+1'}$ を求め、この $\psi^{n+1'}$ より ψ^{n+2} を求め、上の操作を繰り返すことにより、収束を早める方法である。

3.6 メッシュの自動増倍

前節で述べた逐次近似計算では、計算時間は初期値の設定とメッシュ数によって大きく影響を受ける。そこで本コードでは上下対称を仮定し上半面のみを扱う。また精度の高い計算を短時間で行なうため、はじめは粗いメッシュで計算し、ある程度収束したところでメッシュ増倍をすることができる。メッシュ増倍は1回に2倍（メッシュ数で4倍）である。また、次に述べる平衡量の計算が終わった後で、もう1度メッシュを増倍し、プロッターによる図の精度を上げることができる。

3.7 平衡量の計算

平衡分布 ψ_p が求めたならば、その結果から平衡量として次の値を計算する。

- 1) Magnetic axis の位置
- 2) Current peak の位置
- 3) 基準面上での電流分布と圧力分布
- 4) プラズマの全判面積 ($A = \sum \Delta S$)
- 5) プラズマの平均半径 ($a = \sqrt{A/\pi}$)
- 6) プラズマ電流 ($I_p = \sum j_T$)
- 7) 安全係数 ($q/B_t = 2\pi a^2 / \mu_0 I_p R$)
- 8) ポロイダル・ベータ値)

$$\beta_p = \frac{2\mu_0 \bar{P}}{\beta_a^2}$$

ただし

$$\bar{P} = \frac{\int P dV}{\int dV}$$

$$\int P dV = 2\pi \sum P(\psi) \cdot \Delta S$$

$$\int dV = 2\pi \psi R \cdot \Delta S$$

- 9) 内部インダクタンス

$$\ell_i = \frac{B \omega}{B a^2}$$

$$B_a = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$$

$$\overline{B_\omega^2} = \frac{\int B_\omega^2 dV}{\int dV}$$

$$\begin{aligned} \int B_\omega^2 dV &= - \int \frac{\psi}{R^2} L\psi dV = - \int \frac{\psi}{R^2} f(R, \psi) dV \\ &= 2\pi \int \frac{\psi}{R} f(R, \psi) \cdot \Delta S \end{aligned}$$

10) λ, μ の値

3.8 結果のチェック

収束した結果のチェックは、得られた全メッシュの磁束関数 ψ を (2.6) 式の差分形に代入する方法により行なっている。

4 コードの使用法

4.1 入力形式およびその内容

入力データ・カードのフォーマットは 6E12.5 または 6I12 であり、外部導体コイルの位置、電流の入力のみ 3E12.5 であり、単位は全て M.K.S 単位系である。次に入力記号の内容を述べる。

・カード 1

EPS	逐次近似の収束判定値
G	3段階逐次近似の implicit parameter
ALAMBD	λ の値
ANU	μ の値
BETA	β_p の値
ALI	l_i の値

・カード 2

RMIN	R 方向の計算領域の左端 (内側)
RMAX	R 方向の計算領域の右端 (外側)
ZMIN	Z 方向の計算領域の下端
ZMAX	上端
RSUR	固定点又は予想されるセパトリックスの位置 (ただし NINIT=0 のときのみ使用する)

・カード 3

NR	R 方向のメッシュ数
NZ	Z 方向のメッシュ数
I PROFL	電流分布の選択

$$B_a = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$$

$$\overline{B_\omega^2} = \frac{\int B_\omega^2 dV}{\int dV}$$

$$\begin{aligned} \int B_\omega^2 dV &= - \int \frac{\psi}{R^2} L\psi dV = - \int \frac{\psi}{R^2} f(R, \psi) dV \\ &= 2\pi \int \frac{\psi}{R} f(R, \psi) \cdot \Delta S \end{aligned}$$

10) λ, μ の値

3.8 結果のチェック

収束した結果のチェックは、得られた全メッシュの磁束関数 ψ を(2.6)式の差分形に代入する方法により行なっている。

4 コードの使用法

4.1 入力形式およびその内容

入力データ・カードのフォーマットは6E12.5または6I12であり、外部導体コイルの位置、電流の入力のみ3E12.5であり、単位は全てM.K.S単位系である。次に入力記号の内容を述べる。

・カード1

EPS	逐次近似の収束判定値
G	3段階逐次近似の implicit parameter
ALAMBD	λ の値
ANU	μ の値
BETA	β_p の値
ALI	ℓ_i の値

・カード2

RMIN	R方向の計算領域の左端(内側)
RMAX	R方向の計算領域の右端(外側)
ZMIN	Z方向の計算領域の下端
ZMAX	" 上端
RSUR	固定点又は予想されるセパトリックスの位置(ただしNINIT=0のときのみ使用する)

・カード3

NR	R方向のメッシュ数
NZ	Z方向のメッシュ数
I PROFL	電流分布の選択

- = 1 ; パラボリック分布の場合
 = 2 ; フラット分布の場合
- NR.R 逐次近似における返復計算において、磁場の流れ函数分布を打ち出す間隔の指定
- NMAX 上記返復計算回数の上限の指定
- ・カード4
- CONSI プラズマ電流 I_p の値
- BV 一様垂直磁場の大きさ ($NC=0, 2$ のとき)、またはプラズマ中心の B_z の値 ($NINIT=0$ のとき)
- BCEN 初期値を設定する場合にプラズマ電流 I_p を流す位置 ($NINIT=1$ の場合)
- ・カード5
- ILIM 内部または外部固定点の R 方向の位置 ($NFIX=1, 3$ の場合)、またはセパトリックスより内側の基準面上の任意の位置 ($NFIX=0, 2$ の場合)
- JLIM 内部または外部固定点の Z 方向の位置、またはセパトリックスより外側の基準面上の任意の位置
- NFIX プラズマ表面の決め方と、 $I_p = \text{const}$ または λ 、 $\mu = \text{const}$ の選択
 = 0 ; セパトリックス固定、及び $I_p = \text{const}$.
 = 1 ; 内点または外部点固定、及び $I_p = \text{const}$.
 = 2 ; セパトリックス固定、及び λ 、 $\mu = \text{const}$.
 = 3 ; 内点または外部点固定、及び λ 、 $\mu = \text{const}$.
- NINIT 初期値設定の選択
 = 0 ; 3、2 節初期値設定の方法 1) の場合
 = 1 ; " 2) "
 = 2 ; " 3) "
- ・カード6
- Y0 3、2 節初期値設定 3) の場合の Z_p の値
- R0 " R_p "
- AA " a "
- ES2 " ϵ_2 "
- ES3 " ϵ_3 "
- CCC 設定した初期値をさらに定数倍する係数 ($NINIT=2$ の場合)
- ・カード7
- NDOUBL メッシュ増倍をする返復計算の回数の指定
- NSIMP 単純逐次近似か 3 段階逐次近似かの選択
 = 1 ; 単純逐次近似法の場合
 $< 200, \neq 1$; 3 段階逐次近似法から単純逐次近似法へ変わる返復回数の指定
 ≥ 200 ; 3 段階逐次近似法の場合

NCONS	逐次近似計算において加速を開始する反復回数の指定
・カード 8	
NAG	加速の係数 G_a
・カード 9	
TIMAX	逐次近似計算において、返復計算を打ち消る時間
・カード 10	
MDOUBL	プロットを行なう際にメッシュを増倍するかどうかの選択 = 1 ; メッシュを増倍しない ≠ 1 ; メッシュを増倍する
NPLOT	プロット実行の選択 = 0 ; 等磁束面、グラフのプロットをしない = 1 ; グラフのプロットのみ行なう = 2 ; 等磁束面のプロットのみ行なう ≥ 3 ; 等磁束面、グラフの両方のプロットを行なう
・カード 11	
NC	外部導体の選択 = 0 ; 外部導体がない場合 = 1 ; 外部導体がある場合
ICOIL	外部導体の数

以下に外部導体位置および電流のデータカードをおく。

付録 1 に、磁気リミッターコイルがある場合のインプットの 1 例を示す。ただし $I_p=3.33\text{MA}$, $\beta_p=0.5$, $li=1$, パラボリックな電流分布で、 $I_p = \text{const}$ の条件で計算した例である。

4.2 初期値の設定と収束速度および精度の関係

本コードは自由境界値問題の 2 階偏微分方程式を解いているため、初期値の設定と収束速度、および結果の精度は密接に関連している。単純逐次近似の場合は比較的初期値に依らないが、3 段階逐次近似を用いる場合、収束の状況は初期値に非常に依存する。初期値の設定が悪い場合は、implicit parameter G の大きさにあまり関係せずに、返復計算の結果得られる ψ^n , $\psi^{n+\frac{1}{3}}$, $\psi^{n+\frac{2}{3}}$ はほぼ直線的な関係となり、全体としてみるとほぼ同じ振幅で振動しており、 ψ^n と ψ^{n+1} の変化が小さいため解への収束が遅くなることがわかった。また以上の理由より、3 段階逐次近似の場合は一見 Norm が小さくなったようにみえても、その振巾 $(\psi^n - \psi^{n+\frac{2}{3}}) / \psi^n$ が小さくなっていないと収束したとはいえない点に注意しなければならない。また G の大きさは返復における ψ^n と ψ^{n+1} との変化の大きさを与え、 G を大きくすると変化が大きくなる。我々の場合、 $G=0.45$ をとった。返復の回数は、単純、3 段階逐次近似法共に Norm が 10^{-4} 程度になるのに、 33×15 のメッシュ数で 20~60 回程度であるが、一般にパラボリックな場合よりもフラットな場合の方が収束が速い。

付録 1 のインプットの例の場合、使用した記憶容量は 62KW であり、3 段階逐次近似の振巾 $(\psi^n - \psi^{n+\frac{2}{3}}) / \psi^n$ が 0.000146 になるのに約 45 分かかった。他の場合も、パラボリック

クな場合は同程度であり、フラットな場合は20~40分程度である。

また結果の精度は、前章で述べたように $L\psi$ と $L\psi + f(R, \psi)$ を差分により求めたものを比較することにより考察するが、上記インプットの例の場合2~3%の誤差であり、他の場合も収束が良い場合は同程度に押えられることがわかった。

4.3 アウトプットの例

付録2, 3, 4に4.1のインプットによる計算結果のアウトプットを示す。付録2は計算結果の平衡量を示しており、付録3は基準面上における ψ , プラズマ圧力, プラズマ電流分布をプロッターによりかかせたものである。また付録4は等磁束面の様子を図示したもので、 $\psi = 0$ の面がプラズマ表面となっている。

5 おわりに

本コードはこのままで多くの円形, 非円形のトロイダル・プラズマの平衡計算に使用することができる。また外部導体電流を任意に加えることができるので、磁気リミッターがある場合、また制御用コイルによるプラズマの挙動の解析に利用できる。

最後に、吉川兪二氏はじめ、JT-60グループの諸氏に謝意を表わします。

6 参 考 文 献

- 1) 二宮博正, 鈴木康夫, 亀有昭久 JAERI-M 6025
- 2) Suzuki, Y; Nucl. Fusion, 14, 345(1974)
- 3) 亀有昭久, 鈴木康夫, 二宮博正 JAERI-M 6027
- 4) 亀有昭久, 鈴木康夫, 二宮博正 JAERI-M 6028

クな場合は同程度であり，フラットな場合は20~40分程度である。

また結果の精度は，前章で述べたように $L\psi$ と $L\psi+f(R,\psi)$ を差分により求めたものを比較することにより考察するが，上記インプットの例の場合2~3%の誤差であり，他の場合も収束が良い場合は同程度に押えられることがわかった。

4.3 アウトプットの例

付録2, 3, 4に4.1のインプットによる計算結果のアウトプットを示す。付録2は計算結果の平衡量を示しており，付録3は基準面上における ψ ，プラズマ圧力，プラズマ電流分布をプロッターによりかかせたものである。また付録4は等磁束面の様子を図示したもので， $\psi=0$ の面がプラズマ表面となっている。

5 お わ り に

本コードはこのままで多くの円形，非円形のトカイダル・プラズマの平衡計算に使用することができる。また外部導体電流を任意に加えることができるので，磁気リミッターがある場合，また制御用コイルによるプラズマの挙動の解析に利用できる。

最後に，吉川充二氏はじめ，JT-60グループの諸氏に謝意を表わします。

6 参 考 文 献

- 1) 二宮博正，鈴木康夫，亀有昭久 JAERI-M 6025
- 2) Suzuki, Y; Nucl. Fusion, 14, 345(1974)
- 3) 亀有昭久，鈴木康夫，二宮博正 JAERI-M 6027
- 4) 亀有昭久，鈴木康夫，二宮博正 JAERI-M 6028

クな場合は同程度であり、フラットな場合は20~40分程度である。

また結果の精度は、前章で述べたように $L\psi$ と $L\psi + f(R, \psi)$ を差分により求めたものを比較することにより考察するが、上記インプットの例の場合2~3%の誤差であり、他の場合も収束が良い場合は同程度に押えられることがわかった。

4.3 アウトプットの例

付録2, 3, 4に4.1のインプットによる計算結果のアウトプットを示す。付録2は計算結果の平衡量を示しており、付録3は基準面上における ψ , プラズマ圧力, プラズマ電流分布をプロッターによりかかせたものである。また付録4は等磁束面の様子を図示したもので、 $\psi = 0$ の面がプラズマ表面となっている。

5 お わ り に

本コードはこのままで多くの円形, 非円形のトカイダル・プラズマの平衡計算に使用することができる。また外部導体電流を任意に加えることができるので、磁気リミッターがある場合, また制御用コイルによるプラズマの挙動の解析に利用できる。

最後に、吉川充二氏はじめ、JT-60グループの諸氏に謝意を表わします。

6 参 考 文 献

- 1) 二宮博正, 鈴木康夫, 亀有昭久 JAERI-M 6025
- 2) Suzuki, Y; Nucl. Fusion, 14, 345(1974)
- 3) 亀有昭久, 鈴木康夫, 二宮博正 JAERI-M 6027
- 4) 亀有昭久, 鈴木康夫, 二宮博正 JAERI-M 6028

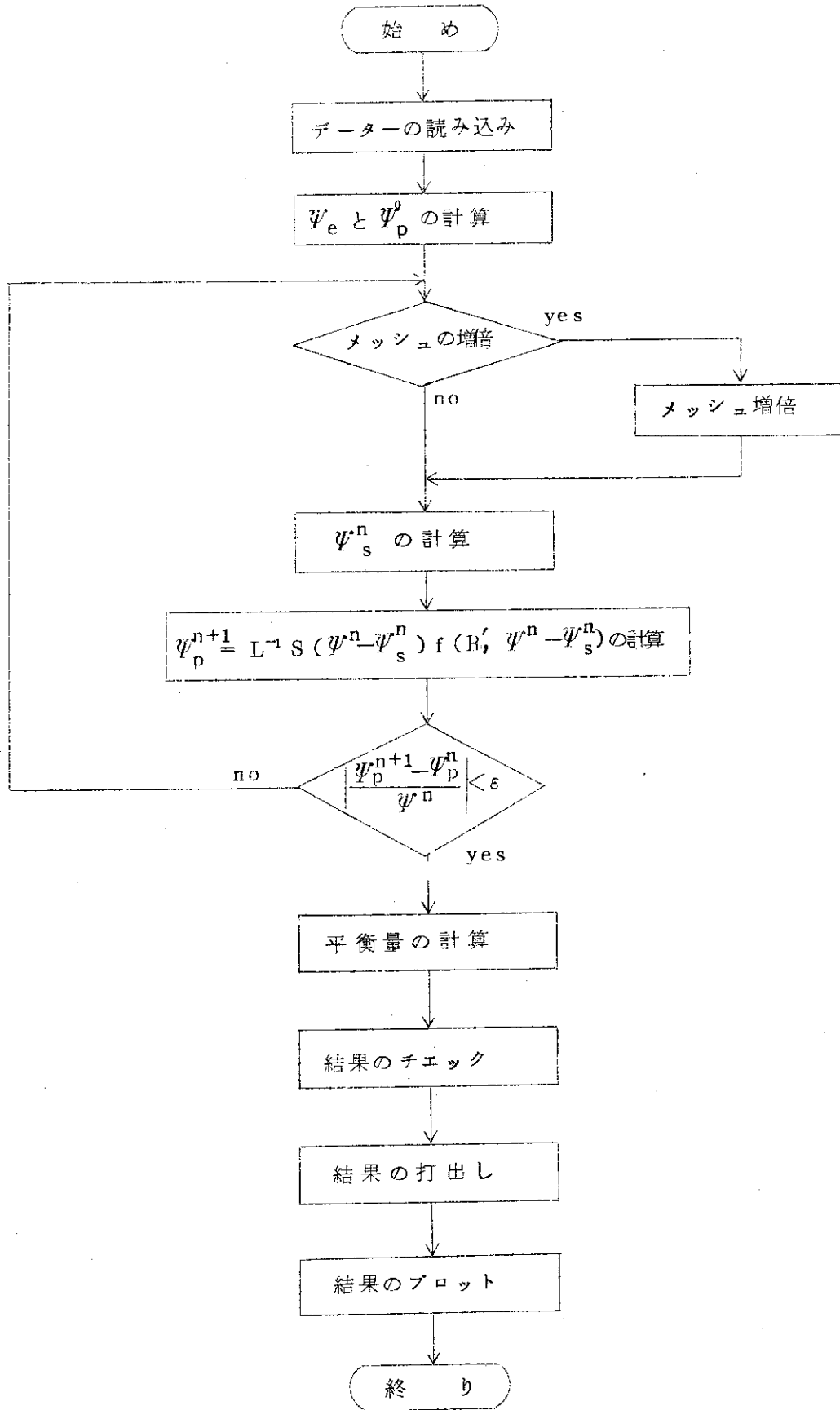


図1 計算コードの概略的なフローチャート

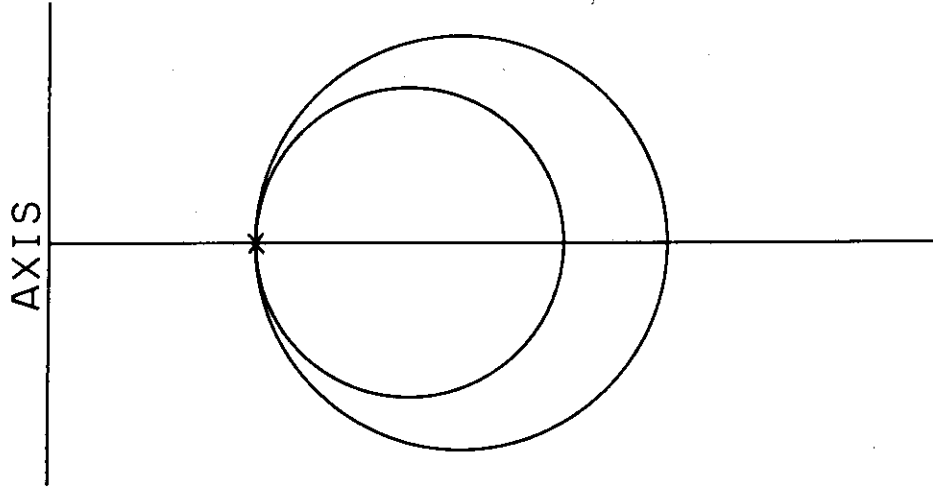


図2 内点固定

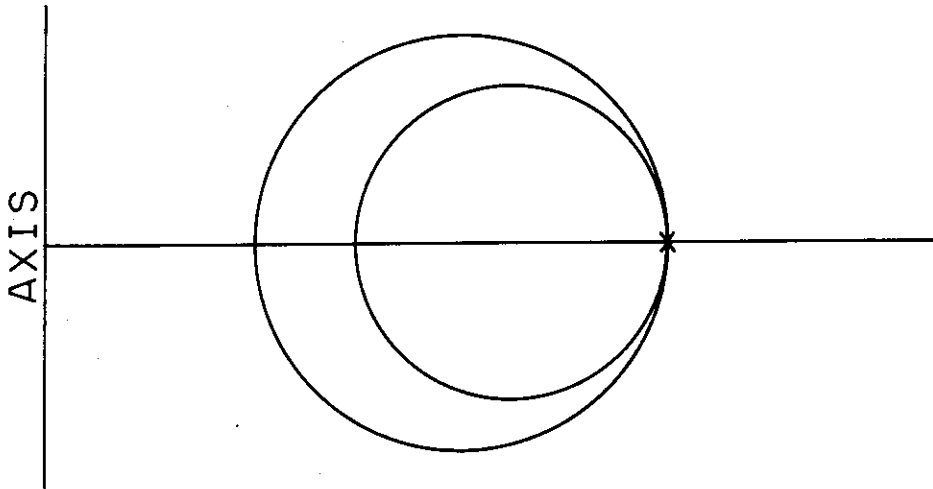


図3 外点固定

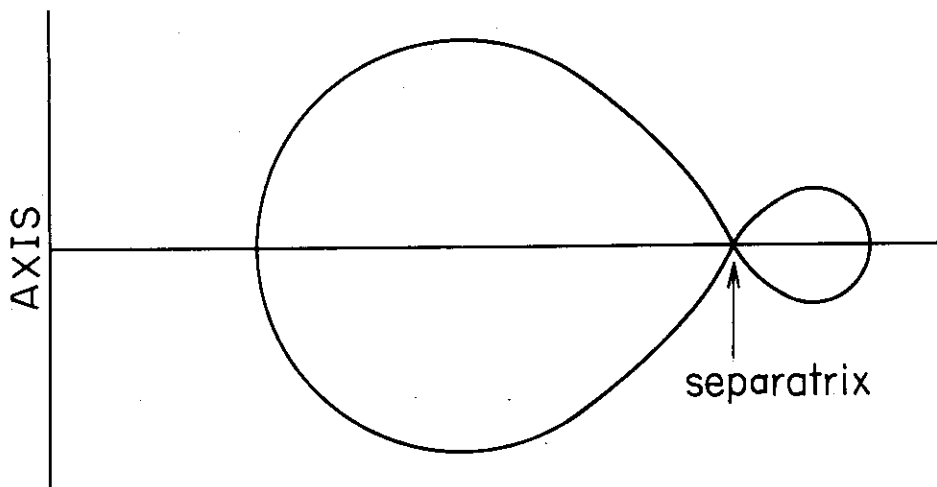


図4 セパトトリックス固定

付録 1. インプットの例

NAME PNAME+ENTRY=ELM(PMAIN)
 DOMAIN HCMY**X**NOVLY
 * PGS LIB
 CALL PAVLIB
 SORT SEGI
 SELEC HELDIN
 FIN

***** LIEU=60 FINIS *****

INPUT SECTION 1

EPS 0.10000000E-05
 G 0.14000000E 01
 ALAMBDA 0.92000000E 00
 ANU -CAL 0.23763993E 01
 BETAP 0.20000000E 00
 INTERNAL INDUCTANCE 0.10000000E 01

ALI

INPUT SECTION 2

R-MINIMUM 0.18000000E 01
 R-MAXIMUM 0.20000000E 01
 Z-MINIMUM 0.0
 Z-MAXIMUM 0.14000000E 01
 R VALUE OF SURFACE 0.53000000E 01

RSUR

INPUT SECTION 3

I PROF 1
 NR 17
 NZ 8
 NKR 5
 NMAX 30
 NDOUBL 15

INPUT SECTION 4

PLASMA CURRENT 0.33300000E 07
 B VERTICAL -0.26000000E 00

CONSI
 BV

INPUT SECTION 5

R (OR LEFT) MESH OF LIMITER 12
 Z (OR RIGHT) MESH OF LIMITER 15
 SIMPLE OR 3-STEP ITERATION 0
 NINIT 1

JLIM
 JLIM
 NFIX

INPUT SECTION 6

YO 0.0
 RO 0.30000000E 01
 AA 0.11250000E 01
 ES2 0.0
 ES3 0.0
 CCC 0.0

INPUT SECTION 7
 INITIAL NA OF ACCEL. 3000 NCONS
 G OF ACCELERATION 0.59999999E J0 ACB
 SIMPLE OR 3-STEP TIE 300 NSIMP

INPUT SECTION 8
 TIMAX 0.38000000E 02

INPUT SECTION 9
 MDOUBLE 1
 NPLYTE 3

EXTERNAL RING POSITION AND RING CURRENTS

1.77623999	0.13254500	162903.68359	1.77623999	-0.13254500	162903.68359
1.83021000	0.40762600	162903.68359	1.83021000	-0.40762600	162903.68359
1.94929001	0.68807501	162903.68359	1.94929001	-0.68807501	162903.68359
2.34894001	1.13905001	162903.68359	2.34894001	-1.13905001	162903.68359
3.23896998	1.40876999	162903.68359	3.23896998	-1.40876999	162903.68359
4.11500699	1.03301999	162903.68359	4.11500699	-1.03301999	162903.68359
4.60184002	0.68862700	162903.68359	4.60184002	-0.68862700	162903.68359
4.60184002	0.68862700	162903.68359	4.60184002	-0.68862700	162903.68359
4.63499999	0.03750000	106250.00000	4.63499999	0.11250000	106250.00000
4.76499999	0.03750000	106250.00000	4.76499999	0.11250000	106250.00000
4.76499999	-0.03750000	106250.00000	4.76499999	-0.11250000	106250.00000
4.21500003	0.34000000	106250.00000	4.21500003	0.46000000	106250.00000
4.28499997	0.34000000	106250.00000	4.28499997	0.46000000	106250.00000
4.28499997	-0.34000000	106250.00000	4.28499997	-0.46000000	106250.00000
4.28499997	-0.34000000	106250.00000	4.28499997	-0.46000000	106250.00000

RESULT
 P1 0.0
 B1 0.0

POSITION OF MESH (R)

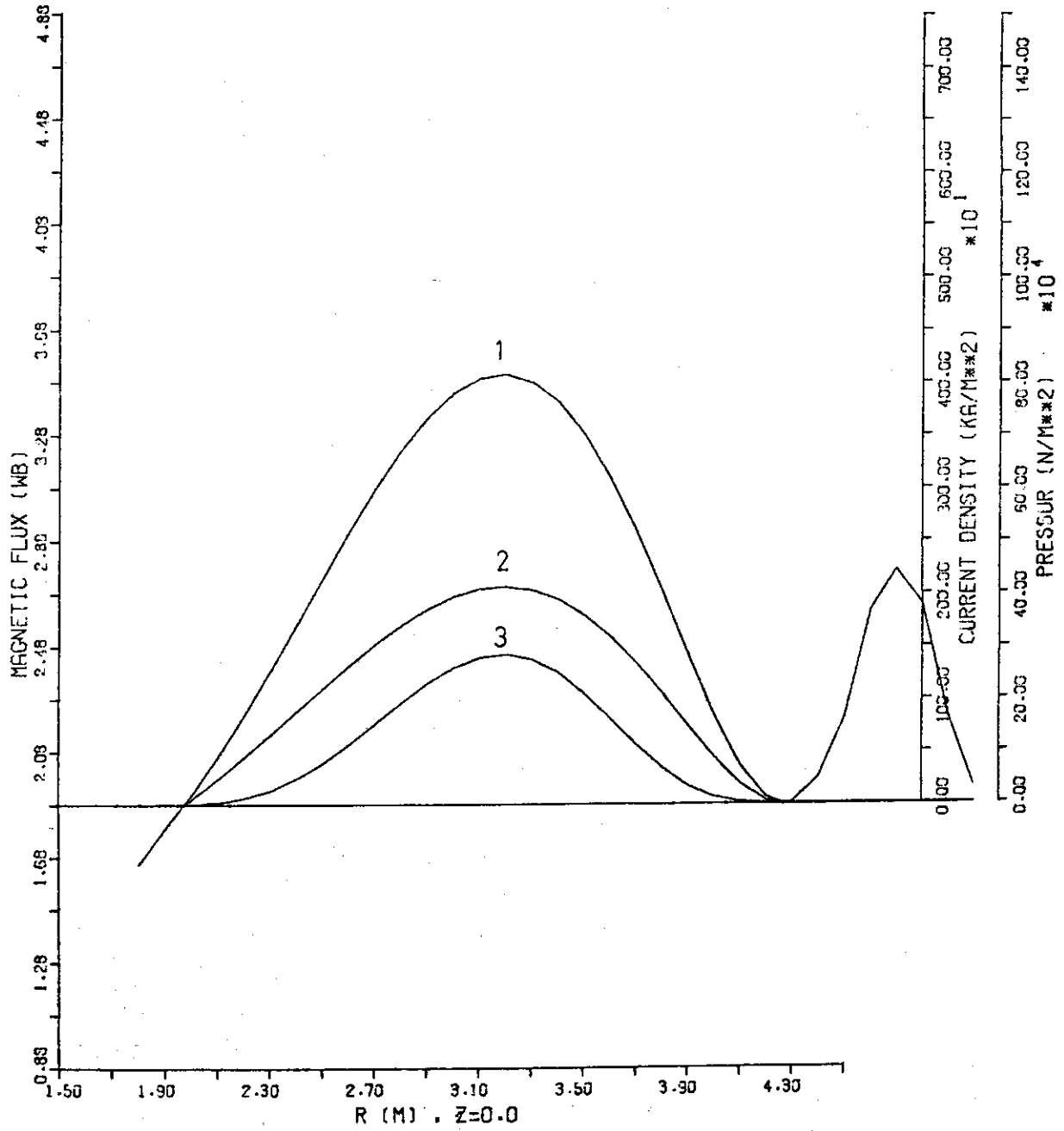
1	1.80000000
2	2.00000000
3	2.19999999
4	2.40000004
5	2.60000002
6	2.80000001
7	3.00000000
8	3.19999999
9	3.40000004
10	3.60000002
11	3.80000001
12	4.00000000
13	4.20000005
14	4.39999998
15	4.60000002
16	4.79999995
17	5.00000000

BCEN 3.12000

PLASMA CURR.(KA)	3330000.000
AVERAGE RADIUS	1.104
MAGNETIC AXIS	3.200
CURRENT MAX.	3.200
BETAP	0.508
SMALL LI	0.978
PSISURLI	1.884
RSUR	4.270

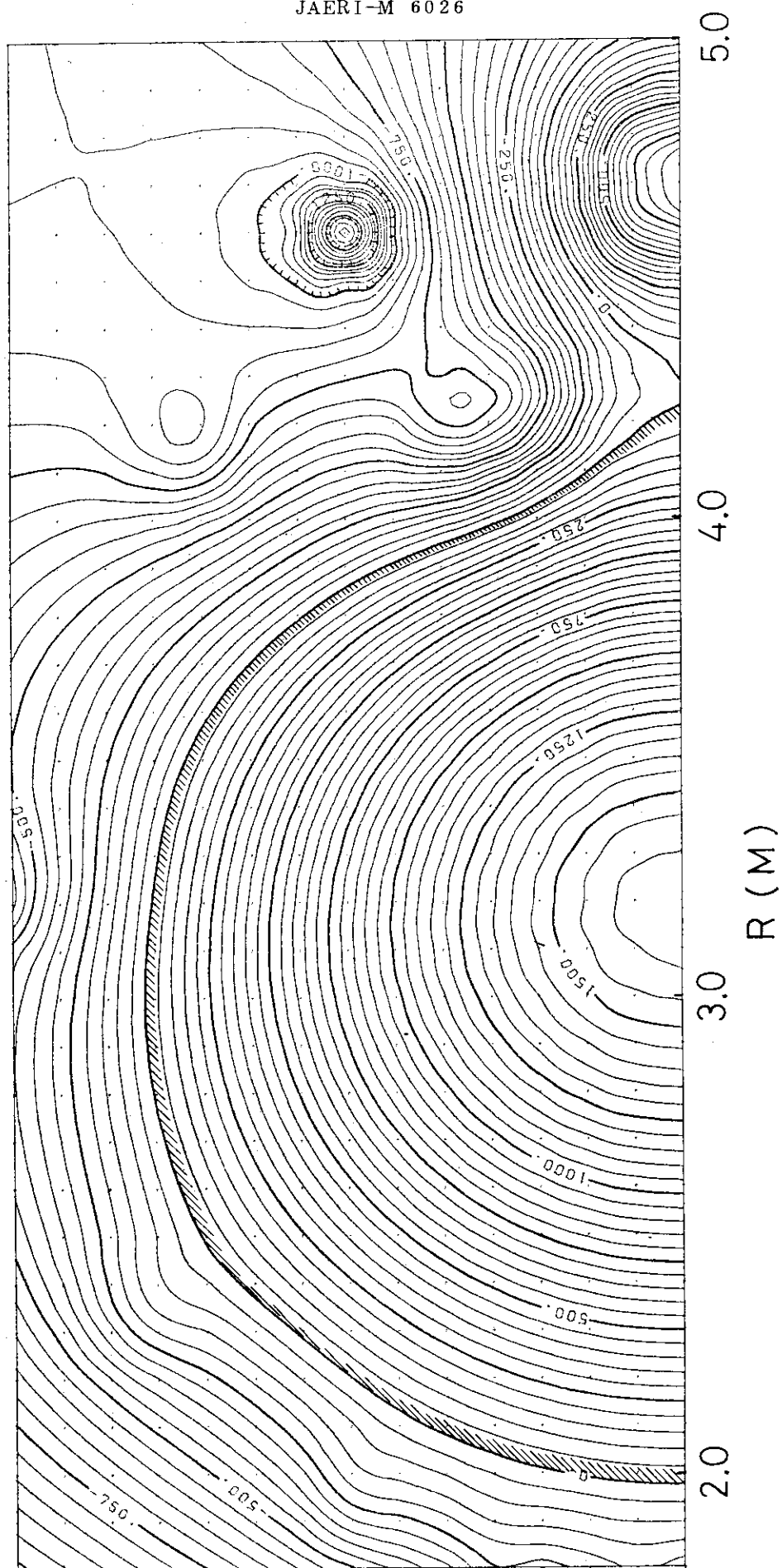
付録2 計算結果の平衡量

- 1 MAGNETIC FLUX
- 2 PLASMA CURRENT
- 3 PLASMA PRESSUR



付録3 基準面上における磁束, プラズマ電流, プラズマ圧力分布

付録4. 平衡プラズマの等磁束面



付録 5

プログラムリスト

```

C ** MAIN **
1 COMMON / TIME / TMAX,MDOUBLE,INPLUT
2 DIMENSION K(65),Z(41),U(65,41),F(65,41),UO(65,41)
3 CALL INPUT(NR,NZ)
4 CALL INIT(NR,NZ,K,Z,U)
5 CALL ITER(NR,NZ,K,Z,U,F,UO)
6 CALL MDUBL(NR,NZ,K,UO)
7 IF(NPLUT.EQ.0,OR,NPLUT.EQ.1) GO TO 10
8 CALL PLTJG(NR,NZ,K,Z,UO)
9 CONTINUE
10 STOP
11 END

C ** INPUT **
1 SUBROUTINE INPUT(NR,NZ)
2 COMMON / ELLIP / ELL(2000)
3 COMMON / JFM / P1,P2,B1,B2,IPROFL
4 COMMON / ITER / EPS,ANU,NR,NMAX,NCONS,ACG,NSIMP,INDOUBL
5 COMMON / MAG / BV
6 COMMON / BETA / BETA,ALLI
7 COMMON / CUR / CONST,BEEN
8 COMMON / POSI / RMAX,RMIN,ZMAX,ZMIN
9 COMMON / SURF / ILM,JLIM,NFIA,NINIT
10 COMMON / SHAPE / RU,AA,ES2,ES3,CCC,KCINI
11 COMMON / COIL / NC,ICOIL,CR,CZ,COIL1
12 DIMENSION CR(200),CZ(200),COIL1(200)

C
13 IOUT=2
14 READ(10) ELL
15 READ(IOUT,1000)END=999) EPS,G,ALAMBDA,ANU,BETA,ALLI
16 READ(IOUT,1000) RMIN,RMAX,ZMIN,ZMAX,RSUR
17 READ(IOUT,1200) NR,NZ,IPROFL,NR,NMAX
18 READ(IOUT,1000) CONST,BV,BEEN
19 READ(IOUT,1200) ILM,JLIM,NFIA,NINIT
20 READ(IOUT,1000) RU,AA,ES2,ES3,CCC
21 READ(IOUT,1200) NDOUBL,NSIMP,NCONS
22 READ(IOUT,1000) ACG
23 READ(IOUT,1000) TMAX
24 READ(IOUT,1200) MDUUBL,NPLUT
25 READ(IOUT,1200) NC,ICOIL
26 IF(NC.EQ.0) GO TO 10
27 READ(IOUT,1100) (CR(I),CZ(I),COIL1(I),I=1,ICOIL)
28
29 10 CONTINUE
30 GO TO (20,30),IPROFL

C
31 ANU=ALAMBDA*NO/BETA*(NO+SWFT(KU*KL-A*AA))/Z,U*(1,0-BETA)
32 P1=0.0
33 P2=ALAMBDA
34 B1=0.0
35 B2=ANU
36 GO TO #0

C
37 30 CONTINUE
38 P1=4.0E-7*CONST*BETA/(AA*AA*NO)
39 P2=0.0
40 B1=4.0E-7*CONST*(KU+SWFT(KU*RU-A*AA))*1,0-BETA)/Z,U*(AA*AA)
41 B2=0.0

C
42 40 CONTINUE
    
```

データの出入力

```

43 IOUT=6
44 WRITE(IOUT,1300) EPS,G,ALAMBDA,ANU,BETA,ALLI
45 WRITE(IOUT,1400) RMIN,RMAX,ZMIN,ZMAX,RSUR
46 WRITE(IOUT,1500) IPROFL,NR,NZ,NR,NMAX,NDOUBL
47 WRITE(IOUT,1600) CONST,BV
48 WRITE(IOUT,1700) ILM,JLIM,NFIA,NINIT
49 WRITE(IOUT,1800) RU,AA,ES2,ES3,CCC
50 WRITE(IOUT,1900) NCONS,ACG,NSIMP
51 WRITE(IOUT,2200) TMAX
52 WRITE(IOUT,2300) MDUUBL,NPLUT
53 IF(NC.EQ.0) GO TO 50
54 WRITE(IOUT,2000) (CR(I),CZ(I),COIL1(I),I=1,ICOIL)
55
56 50 CONTINUE
57 WRITE(IOUT,2100) P1,B1
58 1000 FORMAT(6E12.5)
59 1100 FORMAT(3E12.5)
60 1200 FORMAT(6I12)
61 1300 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 1'/
62 * /15X,'EPS' /E12.8
63 * /15X,'G' /E12.8
64 * /15X,'ALAMBDA' /E12.8
65 * /15X,'ANU -CAL=' /E12.8
66 * /15X,'BETA' /E12.8
67 * /15X,'INTERNAL INDUCTANCE' /E12.8)
68 1400 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 2'/
69 * /15X,'R-MINIMUM' /E12.8
70 * /15X,'R-MAXIMUM' /E12.8
71 * /15X,'Z-MINIMUM' /E12.8
72 * /15X,'Z-MAXIMUM' /E12.8
73 * /15X,'R VALUE OF SURFACE' /E12.8)
74 1500 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 3'/
75 * /15X,'IPROFL' /I10
76 * /15X,'NR' /I10
77 * /15X,'NZ' /I10
78 * /15X,'NRX' /I10
79 * /15X,'NMAX' /I10
80 * /15X,'NDOUBL' /I(10))
81 1600 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 4'/
82 * /15X,'PLASMA CURRENT' /E12.8)
83 * /15X,'B VERTICAL' /E12.8)
84 1700 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 5'/
85 * /15X,'ILM (ON LEFT) MESH OF LIMITER' /I10
86 * /15X,'JLIM (ON RIGHT) MESH OF LIMITER' /I10
87 * /15X,'SIMPLE OR 3-STEP ITERATION' /I10
88 * /15X,'NINIT' /I(10))
89 1800 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 6'/
90 * /15X,'RU' /E12.8
91 * /15X,'AA' /E12.8
92 * /15X,'ES2' /E12.8
93 * /15X,'ES3' /E12.8
94 * /15X,'CCC' /E12.8)
95 1900 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 7'/
96 * /15X,'INITIAL VA OF ACCEL' /I10
97 * /15X,'G OF ACCELERATION' /E12.8)
98 * /15X,'SIMPLE OR 3-STEP ITERATION' /I10)
99 2000 FORMAT(/10X,'INTERNAL MESH POSITION AND RING CURRENTS'/
100 * /15X,'Z(1),Z(2),Z(3),Z(4),Z(5)' /E12.8)
101 2100 FORMAT(/10X,'RESULT' /I10
102 * /15X,'P1' /E12.8)
103 * /15X,'B1' /E12.8)
104 2200 FORMAT(/10X,'INPUT SECTION 8'/
    
```

```

* /15A**TIMAX *1:15.0)
2300 FORMAT(10A**INPUT SECTION 9//
* /15A**DOUBLE *1:10)
* /15A**INPLOILE *1:10)
71 RETURN
72 999 STOP 9999
73 END
    
```

C ** INITIAL VALUE ** 外部垂直磁場と初期値の設定

```

1 SUBROUTINE INIT(NR,NZ,R,Z,U,H)
2 EXTERNAL FPCEN
3 COMMON / DEL / DELH,DELZ,DELTA,HRAD
4 COMMON / POSI / RMAX,RMIN,ZMAX,ZMIN
5 COMMON / SURF / ILIM,JLIM,PSISUR,ISUR,NFIX,RSUR
6 COMMON / MAG / BV
7 COMMON / SHAPE / NU,AA,ESZ,ESS,YO,CCC,NINIT
8 COMMON / CUR / CONST,BCEEN
9 COMMON / COIL / NC,ICOIL,CR,CZ,COIL1
10 DIMENSION CR(200),CZ(200),COIL1(200)
11 DIMENSION M(65),Z(41),U(65,41),H(65,41),UL(65,41)
12 DIMENSION B(65,41)
    
```

```

13 IOU=6
14 PAI=3.14159265358979
15 DELR=(RMAX-RMIN)/(NR-1)
16 DELZ=(ZMAX-ZMIN)/(NZ-1)
17 DELTA=DELH*DELZ
18 RAD=SQRT(DELTA/PAI)
19 DO 10 I=1,NR
20 H(I)=RMIN+DELH*(I-1)
21 CONTINUE
22 WRITE(IOU,1300)
23 DO 20 J=1,NZ
24 WRITE(IOU,1400) I,H(I)
25 CONTINUE
26 DO 30 J=1,NZ
27 Z(J)=ZMIN+DELZ*(J-1)
28 CONTINUE
    
```

```

29 C
30 NAMEU
31 CALL REGFLS(Z,Z,*,U,1,UL=5,FPCEN,1,UL=5,BCEEN,ILL)
32 PLRAD=ABS(RSUR+BCEN)
33 40 CONTINUE
34 DO 80 I=1,NR
35 HR=R(I)
36 IF(NINIT.EQ.2) GO TO 44
37 CALL FIELD(HR,U,BCEN,U,CONST,PS)
38 J(1,1)=PS
39 GO TO 45
40 CONTINUE
41 U(1,1)=FUNC(HR,U,0)*CCC
42 45 CONTINUE
43 IF(NC.EQ.1) GO TO 50
44 H(1,1)=BV*HR*HR/Z,U
45 IF(NC.EQ.0) GO TO 70
46 CONTINUE
47 PSI=0.0
48 QZ=0.
49 IF(NC.EQ.1) H(1,1)=0.0
    
```

超越方程式の根を求めるSSL

```

50 DO 60 JCOIL=1,JCOIL
51 COILR=CR(JCOIL)
52 COILZ=CZ(JCOIL)
53 COILJ=COIL1(JCOIL)
54 CALL FIELD(HR,U,COILR,COILZ,COILJ,PS11)
55 CALL FIELD(HR,U,COILR,COILZ,COILJ,BZZ)
56 PSI=PS1+PS11
57 BZ=BZ+BZZ
58 CONTINUE
59 H(I,1)=H(I,1)+PSI
60 G(I,1)=BZ
61 70 CONTINUE
62 U(I,1)=U(I,1)+H(I,1)
63 CONTINUE
64 IF(NINIT.NE.0) GO TO 120
65 IF(NFIX.NE.0) GO TO 120
66 CALL SEPER(NR,R,U,H)
67 ILEFT=0
68 DO 90 I=1,ISUR
69 IF(U(I,1).GE.PSISUR) GO TO 90
70 ILEFT=ILEFT+1
71 CONTINUE
72 NA=NA+1
73 PRAD=R(ISUR)-H(ILEFT)
74 PLRAD=2.0*PLRAD
75 SA=PRAD+PLRAD
76 IF(NA.GE.5) GO TO 120
77 IF(SA.GE.0.08) GO TO 100
78 IF(SA.LE.=0.08) GO TO 110
79 GO TO 120
80 CONTINUE
81 BCEN=BCEN+0.02
82 GO TO 40
83 CONTINUE
84 BCEN=BCEN=0.02
85 GO TO 40
86 CONTINUE
87 C
88 WRITE(6,1700) BCEN
89 1700 FORMAT(1UX,'BCEN',F12.5)
90 DO 170 I=1,NR
91 HR=R(I)
92 DO 160 J=2,NZ
93 ZZ=Z(J)
94 IF(NINIT.EQ.2) GO TO 124
95 CALL FIELD(HR,ZZ,BCEN,U,CONST,PS)
96 J(I,J)=PS
97 GO TO 125
98 CONTINUE
99 U(I,J)=FUNC(HR,ZZ)*CCC
100 CONTINUE
101 IF(NC.EQ.1) GO TO 130
102 H(I,J)=BV*HR*HR/Z,U
103 IF(NC.EQ.0) GO TO 130
104 CONTINUE
105 PSI=0.0
106 QZ=0.
107 IF(NC.EQ.1) H(I,J)=0.0
108 DO 140 JCOIL=1,JCOIL
109 COILR=CR(JCOIL)
110 COILZ=CZ(JCOIL)
111 COILJ=COIL1(JCOIL)
    
```

```

111 CALL FIELD(NR,ZZ,CU(LR,CULZ,CULJ)+PS11)
112 CALL FIELDB(NR,ZZ,CULR+CULZ,CULJ)+ZZZ
113 PSI=PS1+PS11
114 BZ=BZ+ZZ
115 140 CONTINUE
116 H(1,J)=H(1,J)+PS1
117 S(1,J)=BZ
118 150 CONTINUE
119 UU(1,J)=U(1,J)+H(1,J)
120 160 CONTINUE
121 170 CONTINUE
122 WRITE(IOUT,1000)
123 CALL POUT(CU,NR,NZ)
124 WRITE(IOUT,1100)
125 CALL POUT(CU,NR,NZ)
126 WRITE(IOUT,1600)
127 CALL POUT(B,NR,NZ)
128 WRITE(IOUT,1200)
129 CALL POUT(UU,NR,NZ)
130 FORMAT(//10X,'INITIAL VALUE OF PSI (PLASMA)')
131 1100 FORMAT(//10X,'INITIAL VALUE OF PSI (EXTERNAL)')
132 1200 FORMAT(//10X,'INITIAL VALUE OF PSI')
133 1300 FORMAT(//10X,'POSITION OF MESH (R)')
134 1400 FORMAT(15X,110+5X,F12.0)
135 1600 FORMAT(//10X,'INITIAL VALUE OF B VERTICAL (EXTERNAL)')
136 RETURN
137 END

```

C ** ITERATION ** 逐次近似と収束の判定

```

1 SUBROUTINE ITER(NR,NZ,NZL,NZU)
2 COMMON / ITER / EPS,G,NR,NMAX,NCONS,ALCO,NSIMP,NDOUBL
3 COMMON / SURF / ILM,ULIM,PSISUR,ISCH,NPIA,NSUR
4 COMMON / TIME / T,IMAX,DDOUBL,NPL01
5 DIMENSION H(65),Z(41),U(65,41),V(65,41),PS11(65,41),PS12(65,41),
6 * H(65,41),UU(65,41),W(65,41),PLA1(65,41)
7 CALL CLOCK(MMMH)
8 IOUT=6
9 NA=0
10 NC=0
11 CONTINUE
12 NARM=1
13 NC=NC+1
14 IF(NA.GE.NDOUBL) CALL DOUBLE(NR,NZ,NZL,NZU)
15 CALL SEPER(NR,NZU,H)
16 CALL PSIS(CU,NR,NZL,NZU,H,PS11,PLA1)
17 IF(NA.GE.NSIMP) GO TO 70
18 CALL SEPER(NR,NZ,PS11,H)
19 CALL PSIS(CU,NR,NZL,NZ,PS11,H,PS12,PLA1)
20 ANORM=0.0
21 DO 40 I=1,NR
22 NB=0
23 DO 10 J=1,NZ
24 V(1,J)=0.
25 10 CONTINUE
26 DO 30 J=1,NZ
27 H(1,J)=PLA1(1,J)
28 IF(PL1.LE.0.0) NB=NB+1
29 IF(NB.GE.6) GO TO 40
30 V(1,J)=(1.0-G)*U(1,J)+Z.0*G*PS11(1,J)+G*PS12(1,J)

```

```

31 IF(NB.GE.2) GO TO 30
32 ABSD=(V(1,J)-U(1,J))/V(1,J)
33 ABSD=ABS(ABSD)
34 IF(ABSD>ANORM) 30+20+20
35 20 CONTINUE
36 ANORM=ABSD
37 30 CONTINUE
38 40 CONTINUE
39 BNORM=0.0
40 DO 60 I=1,NR
41 NB=0
42 DO 50 J=1,NZ
43 H(1,J)=PLA1(1,J)
44 IF(PL1.LE.0.0) NB=NB+1
45 IF(NB.GE.6) GO TO 60
46 H(1,J)=U(1,J)
47 U(1,J)=V(1,J)
48 UU(1,J)=U(1,J)+H(1,J)
49 IF(NB.GE.2) GO TO 50
50 ABSD=(V(1,J)-PS11(1,J))/V(1,J)
51 ABSD=ABS(ABSD)
52 IF(ABSD>BNORM) 50+45+45
53 40 CONTINUE
54 BNORM=ABSD
55 50 CONTINUE
56 60 CONTINUE
57 WRITE(IOUT,1300) NA,BNORM
58 IF(NA.LT.NSIMP) GO TO 110
59 70 CONTINUE
60 ANORM=0.0
61 DO 100 I=1,NR
62 NB=0
63 DO 90 J=1,NZ
64 H(1,J)=PLA1(1,J)
65 IF(PL1.LE.0.0) NB=NB+1
66 IF(NB.GE.6) GO TO 100
67 H(1,J)=U(1,J)
68 PS12(1,J)=U(1,J)
69 U(1,J)=PS11(1,J)
70 UU(1,J)=U(1,J)+H(1,J)
71 IF(NB.GE.2) GO TO 90
72 ABSD=ABS((PS11(1,J)-H(1,J))/PS11(1,J))
73 IF(ABSD>ANORM) 90+80+80
74 60 CONTINUE
75 ANORM=ABSD
76 90 CONTINUE
77 100 CONTINUE
78 110 CONTINUE
79 WRITE(IOUT,1100) NA,ANORM,PSISUR
80 IF(ANORM.LT.EPS) GO TO 160
81 CALL CLOCK(MTIME)
82 TIME=(MTIME-MMMH)/60.
83 IF(TIME.GT.TIMAX) GO TO 160
84 IF(NC.GE.NRK) GO TO 120
85 IF(NA.GE.NMAX) GO TO 160
86 IF(NB.GE.NCONS) GO TO 150
87 GO TO 10
88 120 CONTINUE
89 CALL POUT(CU,NR,NZ)
90 CALL POUT(UU,NR,NZ)
91 NC=0

```

```

91 IF (NA,GE,NMAX) GO TO 160
92 IF (NA,GE,NCUN5) GO TO 150
93 GO TO 10
C
94 130 CONTINUE
95 DO 150 I=1,NK
96 DO 140 J=1,NZ
97 SA=(I,J)*U(I,J)
98 U(I,J)=U(I,J)-AC0*SA
99 140 CONTINUE
100 150 CONTINUE
101 GO TO 10
C
102 160 CONTINUE
103 WRITE (IOUT,1100) NA,ANUM,PSISUR
104 CALL SEPER(NR,NZ,PSI2,H)
105 CALL PSIS(2,NK,NZ,K+Z,PSI2,H,U,PLA)
106 DO 150 I=1,NK
107 DO 170 J=1,NZ
108 UU(I,J)=U(I,J)*H(I,J)
109 170 CONTINUE
110 180 CONTINUE
111 CALL PSUI(UU,NN,NZ)
112 CALL EWUL(1,NN,NZ,MM,UU)
113 CALL CHECK(NR,NZ,K+Z,UU)
114 IF (MODDUBL,EB,1) GO TO 185
115 CALL DOUBLE(NR,NZ,K+Z,PSI2,H,UU)
116 180 CONTINUE
117 CALL SEPER(NR,NZ,PSI2,H)
118 DO 200 I=1,NK
119 DO 190 J=1,NZ
120 U(I,J)=PSI2(I,J)
121 190 CONTINUE
122 200 CONTINUE
123 WRITE (IOUT,1000)
124 WRITE (IOUT,1200) PSISUR
125 1000 FORMAT(1H)
126 1100 FORMAT(/,10X,'NA = ',110,10X,'ANUM = ',E15.8,
* 10X,'PSI OF SURFACE = ',E15.8)
127 1200 FORMAT(1H,10X,'PSI OF SURFACE (E501) = ',E15.8)
128 1300 FORMAT(/,10X,'NA = ',110,5X,'NCON OF ONE STEP = ',E15.8//)
129 RETURN
130 END

```

```

C ** CALCULATION OF PSI **
SUBROUTINE PSIS(NA,NR,NZ,K+Z,U,H,PSI,PLA)
COMMON / IEM / EPS,G,NNH,NMAX,NCUN5,AC0,NSIMP,MODDUBL
COMMON / DEL / DELX,DELY,DELTA,SRAD
COMMON / SURF / LIM,ULIM,PSISUR,ISUR,NF,IA,MSUR
COMMON / CUR / CONSI,BCEN
DIMENSION K(65),Z(41),U(65,41),PSI(65,41),H(65,41),PLA(65,41)
C
/ UM=4,DE=1
PAI=3.14159265358979
DO 20 J=1,NZ
DO 10 I=1,NK
PLA(I,J)=0.0
PSI(I,J)=0.0
10 CONTINUE
20 CONTINUE

```

Ψ^m より Ψ^m の計算

```

15 PLI=0.0
16 ADELTA=UM/PAI
17 DO 40 I=1,ISUR
18 PLAR=R(I)
19 DO 30 J=1,NZ
20 H=2.0
21 IF (J,EW,1) P=1.0
22 UPSI=U(I,J)+H(I,J)*PSISUR
23 IF (UPSI,LT,0.0) GO TO 40
24 PLA(I,J)=(FUNTC(PLAR,UPSI)+FUNTC(PLAR,UPSI2))*A
25 PLI=PLI+PLA(I,J)*P
26 30 CONTINUE
27 40 CONTINUE
28 WRITE (6,1000) PLI
29 IF (CONSI=PLI) DO,60,50
30 50 CONTINUE
31 IF (NF,IA,EW,2,UM,NF,IA,EW,3) GO TO 60
32 ALPHA=CONSI/PLI
33 DO 70 I=1,ISUR
34 DO 60 J=1,NZ
35 PLA(I,J)=ALPHA*PLA(I,J)
36 60 CONTINUE
37 70 CONTINUE
38 80 CONTINUE
C
39 DO 160 I=1,NK
40 NB=0
41 NH=N(I)
42 DO 150 J=1,NZ
43 PLI=PLA(I,J)
44 IF (PLI,LE,0.0) NH=NB+1
45 IF (NA,EW,0,AND,NB,GE,6) GO TO 160
46 ZZ=Z(J)
47 PS1=0.0
48 DO 140 II=1,ISUR
49 PLAR=R(II)
50 DO 130 JJ=1,NZ
51 PLAZ=Z(JJ)
52 PI=PLA(II,JJ)
53 IF (PI,LE,0.0) GO TO 140
54 IF (I,EW,1,AND,J,EW,1) GO TO 90
55 CALL FIELD(NR,ZZ,PLAR,PLAZ,PI,PS12)
56 GO TO 100
57 90 CONTINUE
58 PS12=0.5*UM*RH*PI*(ALOG(6.0*PLAR/HAU)+1.5)
59 100 CONTINUE
60 IF (J,EW,1) GO TO 110
61 PLAZZ=PLAZ
62 CALL FIELD(NR,ZZ,PLAR,PLAZZ,PI,PS13)
63 GO TO 120
64 120 CONTINUE
65 PS13=0.0
66 120 CONTINUE
67 PS1=PS11+PS12+PS13
68 130 CONTINUE
69 140 CONTINUE
70 PS1(I,J)=PS11
71 150 CONTINUE
72 160 CONTINUE
73 1000 FORMAT(/10X,'PLASMA CURRENT',5A,E15.8)
74 RETURN
75 END

```

```
C ** FIELD CALCULATION **
SUBROUTINE FIELD(K,Z,CH,CZ,C1,PSI)
COMMON / LLLIP / LLL(5000)
UM=1.0E-7
S=RH+CH*CH+(Z-CZ)*(Z-CZ)
P=2.0*CH*CH
KK=2.0*P/(S+P)
KK=SQRT(KK)
IF(KK.LE.0.5)OR(KK.GE.0.985) GO TO 20
KK=1.000000
K=PI*(KK)
JELK=KK**2
KA=4.9999
KB=KA+1
PSI=(ELL(KR)-ELL(KA))*JELK
PSI=ELL(KA)+PSI
PSI=PSI*C1*5000*(H*CH)
RETURN
20 CONTINUE
IF(KK.GE.0.99999999) KK=0.99999999
CALL CEP125(KK+1.4E+1E+1E6)
PSI=UM*C1*5000*(K*CH)*(1.0+KK*KK/2.0)*Z*(Z-LL)/KK
RETURN
END
```

磁束の計算

$\frac{\mu_0}{R} \left\{ \left(1 - \frac{R^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\}$, 0.5 ≤ k < 0.985 の値

完全楕円積分を求めるSSL

```
C ** FIELD CALCULATION **
SUBROUTINE FIELDB(R,Z,CH,CZ,C1,BZZ)
UM=1.0E-7
S=RH+CH*CH+(Z-CZ)*(Z-CZ)
P=2.0*CH*CH
KK=2.0*P/(S+P)
KK=SQRT(KK)
IF(KK.LE.0.99999999) KK=0.99999999
CALL CEP125(KK+1.4E+1E+1E6)
BZZ=UM*C1/(2.0*5000*(S+P))*Z*(Z-(S-2.0*CH*CH)/(S+P))*ZL
RETURN
END
```

磁場の計算

```
C ** FUNCTION FPCEN **
FUNCTION FPCEN(X)
COMMON / SURF / ILIM,JLIM,PSISUM,ISUR,NFIX,MSUR
COMMON / BETA / BETA,ALI
COMMON / MAG / MAG,BV
COMMON / CUN / CUNSI,BCEN
UM=1.0E-7
IF(NFIX.EQ.1) GO TO 10
PLA=MSUR*X
FPCEN=(ALOG(8*X/PLA)+BETA+0.5*ALI-1.5)*CUNSI*UM/X+BV
RETURN
10 CONTINUE
PLA=MSUR
FPCEN=(ALOG(8*X/PLA)+BETA+0.5*ALI-1.5)*CUNSI*UM/X+BV
RETURN
END
```

プラズマ中心の計算

```
C ** SEPERATRIX CALCULATION **
SUBROUTINE SEPER(NR,R,UM)
COMMON / SURF / ILIM,JLIM,PSISUM,ISUR,NFIX,MSUR
DIMENSION K(65),U(65),A(2),M(65,4)
IF(NFIX.EQ.1)OR(NFIX.EQ.3) GO TO 40
ISUR=1
SUR=U(ILIM-1,1)+M(ILIM-1,1)
DO 20 I=ILIM,JLIM
PSISUM=U(I,1)+M(I,1)
IF(PSISUM.LT.SUR) GO TO 10
PSISUM=SUR
GO TO 20
10 CONTINUE
ISUR=I
SUR=PSISUM
20 CONTINUE
B1=K(ISUR-1)
B3=K(ISUR+1)
B2=K(ISUR)
A1=B1*B1
A2=B2*B2
A3=B3*B3
D1=U(ISUR-1,1)*M(ISUR-1,1)
D2=PSISUM
D3=U(ISUR+1,1)*M(ISUR+1,1)
AA1=A1-A2
BB1=B1-B2
DD1=D1-D2
AA2=A1-A3
BB2=B1-B3
DD2=D1-D3
A1=AA1/BB1
DD1=DD1/BB1
AA2=AA2/BB2
DD2=DD2/BB2
30 CONTINUE
WRITE(6,1000) PSISUM,MSUR,ISUR
RETURN
40 CONTINUE
PSISUM=U(ILIM,JLIM)+M(ILIM,JLIM)
ISUR=NR
MSUR=M(ILIM)
WRITE(6,1000) PSISUM,MSUR,ISUR
1000 FORMAT(1X,PSISUM= ,1E14,6,3X,MSUR= ,1E14,6,3X,ISUR= ,110)
RETURN
END
```

セパトリングスの位置の計算

```
C ** EQUILIBRIUM QUANTITIES **
SUBROUTINE EQUIL(NR,NZ,UM)
COMMON / SURF / ILIM,JLIM,PSISUM,ISUR,NFIX,MSUR
COMMON / SHAPE / KU,AA,ESZ,ESS,TO,CCC,IN,II
COMMON / DEL / DELN,DELZ,DELTA8,DEL
COMMON / CUN / CUNSI,BCEN
```

プラズマ平衡量の計算

```

6 COMMON / TIME / TIME,MM,DD,IN,PL01
7 COMMON / JTK / J1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45
8 DIMENSION K(65),PS1(65),PS2(65),CC(5),U(6),J(1),PL1(65)
9 C
10 ICUM=0
11 PL1=0.0
12 PL2=0.0
13 PL3=0.0
14 PL4=0.0
15 PL5=0.0
16 PA=3.14159265358979
17 UM=PA/4.UL=7
18 RW
19 DO 20 I=1,ISUR
20 RR=K(I)
21 PSM(I)=1
22 IF (PS1,LT,PSISUR) GO TO 20
23 PS1=PS1+PSISUR
24 K=K+1
25 VOL=VOL+RR
26 PL1=PL1+PUNTCP(RR,PS1)*DELTAS
27 PL2=PL2+PUNTCI(RR,PS1)*DELTAS
28 PL3=PL3+FINTEI(RR,PS1)*DELTAS
29 PL4=PL4+PSI*FINTE2(RR,PS1)*DELTAS/RR**2
30 PL5=PL5+FINTEI(RR,PS1)*DELTAS*RR
31 PL6=PL6+PSI*FINTE2(RR,PS1)*DELTAS/RR**2*RR
32 DO 10 J=2,NZ
33 PS1=U(I,J)
34 IF (PS1,LT,PSISUR) GO TO 20
35 PS1=PS1+PSISUR
36 K=K+2
37 VOL=VOL+2.0*RR
38 PL1=PL1+PUNTCP(RR,PS1)*DELTAS*2.0
39 PL2=PL2+PUNTCI(RR,PS1)*DELTAS*2.0
40 PL3=PL3+FINTEI(RR,PS1)*DELTAS*2.0
41 PL4=PL4+PSI*FINTE2(RR,PS1)*DELTAS/RR**2*2.0
42 PL5=PL5+FINTEI(RR,PS1)*DELTAS*2.0*RR
43 PL6=PL6+PSI*FINTE2(RR,PS1)*DELTAS/RR**2*2.0*RR
44 10 CONTINUE
45 20 CONTINUE
46 C
47 IF (PL1+PL2,EW,0.0) GO TO 100
48 BETAP1=PL1/(PL1+PL2)
49 AREA=K*DELTAS
50 VOL=2.0*VOL*PA*DELTAS
51 PLA=(PL1+PL2)/UM
52 PLAI=ABS(PLAI)
53 CONSK=CONSK/PLAI
54 IF (NFI,EW,2.0,OR,NFI,EW,3) CONSK=1.0
55 P1=P1*CONSK
56 P2=P2*CONSK
57 D1=D1*CONSK
58 D2=D2*CONSK
59 BETAP2=PL3*8.0*PA/CONSK/(UM*PLAI**2)
60 TINTIN=PL4**4.0*PA/CONSK/(UM*PLAI)**2
61 AVERAD=SWHT(AREA/PA)
62 QVAL=2.0*PA*(AVERAD+AVERAD)/RU/(PL1+PL2)/CONSK
63 QVAL=ABS(QVAL)
64 BETAP3=PL5*16.0*PA**3*AVERAD**2/(VOL*PLAI**2*UM*CONSK)
65 TINTID=PL6*8.0*PA**3*AVERAD**2/(VOL*(UM*PLAI)**2*CONSK)

```

平均計算
L1の"

```

66 PSISU=0.0
67 AM=0.0
68 BM=0.0
69 WRITE(100,1400)
70 DO 50 I=1,NR
71 RR=K(I)
72 C=0.0
73 CC(I)=C
74 PRES(I)=0.0
75 PS=U(I,1)
76 PS1(I)=PS
77 PP=PS+PSISUR
78 IF (PP,LT,0.0) GO TO 40
79 IPP=I
80 IF (PP,LT,AM) GO TO 30
81 AM=PP
82 ICEN(I)=I
83 30 CONTINUE
84 C=ABS(PUNTCP(RR,PP)+PUNTCI(RR,PP))
85 IF (I,GT,ISUR) C=0.0
86 C=C/UM
87 CC(I)=C
88 PRES(I)=FINTEI(RR,PP)
89 IF (I,GT,ISUR) PRES(I)=0.0
90 IF (C,LT,0.0) GO TO 40
91 BMC=C
92 ICUM=I
93 40 CONTINUE
94 WRITE(100,1100) I,RR,PS,C,PRES(I)
95 50 CONTINUE
96 SINDU=2.0*PA*(AM+PSISU)/PLAI/CONSK
97 TINTD=8.0*PA**3*SINDU/UM/(2.0*PA)*RU
98 C
99 IF (NFI,EW,0.0,OR,NFI,EW,1) PLAI=CONSK
100 WRITE(100,1000)
101 WRITE(100,1200) BETAP1+BETAP2*(ICEN) IN(ICUM),PLAI,AREA,
* AVERAD,QVAL,SINDU,TINTIN,TINTID,BETAP3,TINTID,
* P1,P2,D1,D2
102 100 CONTINUE
103 C
104 DO 70 J=1,NZ
105 DO 60 I=1,NR
106 PSM(I)=1
107 IF (U(I,J),LT,PSISUR) PSM(I)=1
60 CONTINUE
108 WRITE(100,1300) (PSM(I),I=1,NR)
70 CONTINUE
109 IF (NPL0T,EW,0.0,OR,NPL0T,EW,2) GO TO 80
110 CALL PLOTER(NR,RR,AVERAD,ICEN,RR,ICUM),BETAP2,TINTIN,
* PS,CC,PRES)
111 80 CONTINUE
112 1000 FORMAT(1X,1//10A,PLASMA PARAMETER (F EQUATION)
113 1100 FORMAT(10A,16,1P,15A,11F,8)
114 1200 FORMAT(15A,DELTAP,
* /15A,BETAP=BY SUZUKI=,
* /15A,MAGNETIC AXIS,
* /15A,CURRENT (MM) SAIS,
* /15A,PLASMA CURRENT,
* /15A,CROSS SECTION,
* /15A,AVERAGE RADII,
* /15A,Q VALUE (W),
* /15A,SELF INDUCTANCE

```



```

* /15X,'INTERNAL INDUCTANCE' *E15.8
* /15X,'INT.IND.,=BY SURF.' *E15.8
* /15X,'BETAP =VOLUME INTE=' *E15.8
* /15X,'INT.IND., =VOLUME=' *E15.8
* /15X,'PI' *E15.8
* /15X,'LAMUDA' *E15.8
* /15X,'B1' *E15.8
* /15X,'MU' *E15.8/////
115 1300 FORMAT(10X,'QAL)
116 1400 FORMAT(/////10X,'PLASMA CURRENT AND PRESSURE OF AXIS'////)
117 RETURN
118 END
    
```

```

C ** POUT **
SUBROUTINE POUT(N,IMX,JMX)
DIMENSION N(165,41)
JM=50
IOUT=6
K=0
DO 40 I1=1,IMX,10
I2=I1+9
IF(I2.GT.IMX) I2=IMX
ISWT=0
J1=1
J2=JM
IF(J2.GT.JMX) J2=JMX
10 CONTINUE
IF(ISWT.EQ.0) GO TO 20
J1=J1+JM
J2=J2+JM
IF(J2.GT.JMX) J2=JMX
20 CONTINUE
IF(K.EQ.0) WRITE(IOUT,1000)(I1=I1,I2)
IF(K.NE.0) WRITE(IOUT,1100)(I1=I1,I2)
K=1
DO 30 J=J1,J2
WRITE(IOUT,1200) J,(N(I,J),I1=I1,I2)
IF(J/505.EQ.J) WRITE(IOUT,1300)
30 CONTINUE
IF(J2.GE.JMX) GO TO 40
ISWT=1
GO TO 10
40 CONTINUE
RETURN
1000 FORMAT(/// 7H J 1,2+13,5X,9(4X,13,5X))
1100 FORMAT(/////7H J 1,2X+13,5X,9(4X,13,5X))
1200 FORMAT(1H ,13,2X+1P10E12,+4)
1300 FORMAT(1H )
END
    
```

行列式の打出し

```

C ** FUNCTION FUNCG **
FUNCTION FUNCG(X,Y)
COMMON / SHAPE / R0,AA,ES2,ES3,Y0,CCC,NIN11
N=SQRT((X-R0)**2+(Y-Y0)**2)
IF(X.EQ.R0) GO TO 10
T=ATAN((Y-Y0)/(X-R0))
IF(X.LT.R0) T=T+3.14159265358979
GO TO 20
    
```

初期値の設定

```

10 CONTINUE
T=1.57079633
IF(Y.LT.Y0) T=-T
20 CONTINUE
FUNCG=R0*((1.0-ES2*COS(2.0*T))-R/AA*ES3*COS(3.0*T))-AA*AA
RETURN
END
    
```

```

C ** FUNCTION FUNTCP **
FUNCTION FUNTCP(X,PS)
COMMON / JTR / P1,P2,B1,B2,IPROFL
GO TO (10,20),IPROFL
10 FUNTCP=P2*X*PS
RETURN
20 FUNTCP=P1*X
RETURN
END
    
```

```

C ** FUNCTION FUNTC1 **
FUNCTION FUNTC1(X,PS)
COMMON / JTR / P1,P2,B1,B2,IPROFL
GO TO (10,20),IPROFL
10 FUNTC1=B2/X*PS
RETURN
20 FUNTC1=B1/X
RETURN
END
    
```

```

C ** FUNCTION FINTE1 **
FUNCTION FINTE1(X,PS1)
COMMON / JTR / P1,P2,B1,P2,IPROFL
PAI=3.14159265358979
IM=PAI*1.E-7
GO TO (10,20),IPROFL
10 CONTINUE
FINTE1=P2*PS1*PS1/2.0*UM
RETURN
20 CONTINUE
FINTE1=P1*PS1/UM
RETURN
END
    
```

```

C ** FUNCTION FINTE2 **
FUNCTION FINTE2(X,PS1)
COMMON / JTR / P1,P2,B1,B2,IPROFL
GO TO (10,20),IPROFL
10 CONTINUE
FINTE2=(P2*X*B2)*PS1
RETURN
20 CONTINUE
FINTE2=P1*X*B1
RETURN
END
    
```

```

C ** CHECK OF RESULT **
SUBROUTINE CHECK(NK,NZ,M,Z,U)
COMMON / DEL / DELX,DELY,DELTAZ,HRAD
COMMON / SURF / ILIM,JLIM,PSISUR,ISUR,NFIX,PSUR
DIMENSION H(65),Z(41),U(65,41),I(65,41),N(65,41)
DO 30 J=1,NZ
DO 20 I=1,NK
IF(I.EW.1.OR.I.EV.NR.OR.J.EG.1.OR.J.EV.NZ) GO TO 10
I(I,J)=U(I+1,J)+Z(U(I,J)+U(I,J-1))/DELT**2
+U(I,J+1)+Z(U(I,J)+U(I,J-1))/DELT**2
-U(I+1,J)-U(I-1,J))/2./DELH/C(I)
9
0=0.0
IF(U(I,J).GE.PSISUR) 0=FINITE2(H(I)+U(I,J)-PSISUR)
*(I,J)=0+T(I,J)
11
*(I,J)=0+T(I,J)
12
GO TO 20
13
10 CONTINUE
14
I(I,J)=0.
15
*(I,J)=0.
16
20 CONTINUE
17
30 CONTINUE
18
CALL POUT(I,NK,NZ)
19
CALL POUT(M,NK,NZ)
20
RETURN
21
END

```

結果のチェック

```

C ** DOUBLE OF MESH **
SUBROUTINE DOUBLE(NK,NZ,M,Z,U,M,U)
COMMON / SURF / ILIM,JLIM,PSISUR,ISUR,NFIX,PSUR
COMMON / CUR / CONSI,BLEN
COMMON / DEL / DELX,DELY,DELTAZ,HRAD
COMMON / PSI / RMAX,RMIN,ZMAX,ZMIN
COMMON / MAG / BV
COMMON / COIL / NC1,COIL1,CR+CZ,COIL1
DIMENSION CR(200),CZ(200),COIL1(200)
DIMENSION H(65),Z(65),H(65),Z(65),U(65,41),N(65,41),
* PLAI(65,41),U(65,41)
10
UM=0.0E-7
11
PAI=3.14159265358979
12
DO 20 I=1,NK
13
H(I)=H(I)
14
DO 10 J=1,NZ
15
Z(J)=Z(J)
16
PLAI(I,J)=0.0
17
10 CONTINUE
18
20 CONTINUE
19
IOUT=6
20
CALL SEPER(NK,M,U,M)
21
PLI=0.0
22
A=DELTAZ/(UM*PAI)
23
DO 40 I=1,ISUR
24
PLAR=R(I)
25
DO 30 J=1,NZ
26
P=2.0
27
IF(J.EV.1) P=1.0
28
UPSI=U(I,J)+H(I,J)-PSISUR
29
IF(UPSI.LT.0.0) GO TO 40
30
PLAI(I,J)=(FUNTC(PLAR,UPSI)+FUNTC(PLAR,UPSI))*A
31
PLI=PLI+PLAI(I,J)*P
32
30 CONTINUE
33
40 CONTINUE

```

メッシュの増倍

```

34
IF(CONSI=PLI) DO 80,50
35
50 CONTINUE
36
IF(NFIX.EG.2.OR.NFIX.EV.3) GO TO 80
37
ALPHA=CONSI/PLI
38
DO 70 I=1,ISUR
39
DO 60 J=1,NZ
40
PLAI(I,J)=ALPHA*PLAI(I,J)
41
60 CONTINUE
42
70 CONTINUE
43
80 CONTINUE
44
NRR=NR
45
NR=(NK-1)*2+1
46
NZ=NZ
47
NZ=(NZ-1)*2+1
48
DELH=(RMAX-RMIN)/(NK-1)
49
DELZ=(ZMAX-ZMIN)/(NZ-1)
50
ILIM=(ILIM-1)*2+1
51
IF(NFIX.EV.0.OR.NFIX.EV.2) JLIM=(JLIM-1)*2+1
52
DO 90 I=1,NK
53
H(I)=RMIN+DELH*(I-1)
54
90 CONTINUE
55
WRITE(IOUT,1000)
56
WRITE(IOUT,1100) (I,R(I),I=1,NK)
57
DO 100 J=1,NZ
58
Z(J)=ZMIN+DELZ*(J-1)
59
100 CONTINUE
60
DO 210 I=1,NK
61
RR=R(I)
62
DO 200 J=1,NZ
63
PSI=0
64
ZZ=Z(J)
65
DO 160 II=1,NKK
66
PLAR=RD(II)
67
DO 150 JJ=1,NZZ
68
PLAZ=Z(JJ)
69
PLI=PLAI(II,JJ)
70
IF(PLI.LE.0.0) GO TO 180
71
KSA=RR*PLAR
72
KSA=ABS(KSA)
73
ZSA=ZZ-PLAZ
74
ZSA=ABS(ZSA)
75
IF(RSA.LE.1.0E-7.AND.ZSA.LE.1.0E-7) GO TO 110
76
CALL FIELD(NR,ZZ,PLAR,PLAZ,PLI,PSI)
77
GO TO 120
78
110 CONTINUE
79
PSI1=0.5*UM*RR*PLI*(ALOG(6.0*PLAR/RAD)+1.5)
80
120 CONTINUE
81
IF(JJ.EV.1) GO TO 130
82
PLAZZ=PLAZ
83
CALL FIELD(NR,ZZ,PLAR,PLAZZ,PLI,PSI2)
84
GO TO 140
85
130 CONTINUE
86
PSI2=0.0
87
140 CONTINUE
88
PSI=PSI+PSI1+PSI2
89
150 CONTINUE
90
160 CONTINUE
91
U(I,J)=PSI
92
IF(NC.EV.1) GO TO 170
93
H(I,J)=OV*H*RR/Z,U
94
IF(NC.EV.0) GO TO 190
95
170 CONTINUE

```

```

96 PSI=0.0
97 IF (C(1),G(1),AND,C(1)+1,G(1)) GO TO 10
98 GO TO 20
99 C(1)=C(1)+1
100 C(1)=C(1)+1
101 C(1)=C(1)+1
102 CALL F(1,C(1),C(1))
103 PSI=PSI+PSI
104 100 CONTINUE
105 H(1)=H(1)+PSI
106 190 CONTINUE
107 S(1)=S(1)+H(1)
108 200 CONTINUE
109 210 CONTINUE
110 DELTA=DELTA+DELTA
111 RAD=RAD(DELTA/PI)
112 WRITE(100,1200)
113 CALL PLOT(1,1,1)
114 WRITE(100,1300)
115 CALL PLOT(1,1,1)
116 WRITE(100,1400)
117 CALL PLOT(1,1,1)
118 1000 FORMAT(1M,10A,'POSITION OF NEW PSI ( )')
119 1100 FORMAT(12(10A,110,10A,12,12))
120 1200 FORMAT(7(10A,'VALUE OF PSI (PLASMA)')')
121 1300 FORMAT(7(10A,'VALUE OF PSI (EXTERNAL)')')
122 1400 FORMAT(7(10A,'VALUE OF PSI')')
123 RETURN
124 END

```

```

C ** SUBROUTINE PLOT **
1 SUBROUTINE PLOT(J,N,K,Z)
2 COMMON / SURF / LIM,JLIM,PSISUR,ISUR,NFI,NSUR
3 DIMENSION R(65),Z(1+1),U(65,41)
4 DO 20 I=1,NR
5 KR=R(I)
6 DO 10 J=1,NZ
7 ZZ=Z(J)
8 U(I,J)=U(I,J)+PSISUR
9 PSI=U(I,J)*1000.0
10 WRITE(1,1000) KR,ZZ,PSI
11 10 CONTINUE
12 20 CONTINUE
13 WRITE(1,1100)
14 1000 FORMAT('CNTL ',2F10.3,*,10,3,40X)
15 1100 FORMAT('END ',*,10X)
16 RETURN
17 END

```

等磁束面のプロット

```

C ** SUBROUTINE PLOTEN **
1 SUBROUTINE PLOTEN(KR,AVRAD,RICENT,RICOR,DELTA,PI,INTI,
2 PSS,CC,PRES)
3 COMMON / SURF / LIM,JLIM,PSISUR,ISUR,NFI,NSUR
4 COMMON / CUR / CURS,BCEN
5 DIMENSION R(65),PSS(65),CC(65),PRES(65),RN(65)
6 CALL PLOT(1,1,1)
7 DO 20 I=1,NR
8 RN(I)=R(I)

```

グラフのプロット

```

8 IF (C(1),G(1),AND,C(1)+1,G(1)) GO TO 10
9 IF (C(1),G(1),AND,C(1)+1,G(1)) GO TO 30
10 GO TO 20
11 10 CONTINUE
12 H(1)=H(1)+PSI
13 20 CONTINUE
14 30 CONTINUE
15 IF (PSS(1),G(1),PSISUR,AND,PSS(1)+1,L(1),PSISUR) GO TO 40
16 H(1)=H(1)+PSI
17 PSI=PSISUR
18 GO TO 50
19 40 CONTINUE
20 H(1)=H(1)+PSI
21 PSI=PSISUR
22 50 CONTINUE
23 IZ=1
24 N=1
25 N=N+2
26 N=N/2+1
27 PPSISUR=PSISUR-1.0
28 DO 60 I=1,2+3*N
29 RN(N+1+3-I)=RN(N+1+2-I)
30 CC(N+1+3-I)=CC(N+1+2-I)*1.E-3
31 PSS(N+1+3-I)=PSS(N+1+2-I)
32 PRES(N+1+3-I)=PRES(N+1+2-I)
33 IF (PSS(N+1+3-I)=PSS(N+1+2-I)) PPSISUR=PPSISUR
34 CONTINUE
35 DO 70 I=1,1+2+2+1
36 H(1+1+3-I)=H(1+1+2-I)
37 CC(1+1+3-I)=CC(1+1+2-I)*1.E-3
38 PSS(1+1+3-I)=PSS(1+1+2-I)
39 PRES(1+1+3-I)=PRES(1+1+2-I)
40 70 CONTINUE
41 H(1+1)=H(1)
42 H(1+2)=H(1)
43 CC(1+1)=0.
44 CC(1+2)=0.
45 PSS(1+1)=PSISUR
46 PSS(1+2)=PSI
47 PRES(1+1)=0.0
48 PRES(1+2)=0.0
49 H(N+1)=1.5
50 H(N+2)=0.02
51 PSS(N+1)=PPSISUR
52 PSS(N+2)=0.02
53 CC(N+1)=0.0
54 CC(N+2)=0.0
55 PRES(N+1)=0.0
56 PRES(N+2)=1.E+4
57 A=(PSISUR+PSS(N+1))/PSS(N+2)
58 H=200.0-A

```

```

59 CALL PLOT(1,1,1)
60 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,PLASMA CURR,(N+1),0,0,10)
61 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,AVERAGE RAD,10,0,0,10)
62 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,MAGNETIC AXIS,0,0,0,10)
63 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,CURRENT MAX,0,0,0,10)
64 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,DELTA,0,0,0,10)
65 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,SHIELD LI,0,0,0,10)
66 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,PSISUR LI,0,0,0,10)
67 CALL SYMBOL(0,0,100,0,0,0,10,NSUR,0,0,0,10)
68 CALL NUMBER(100,0,100,0,0,0,COVS,0,0,0,10)

```

```

69 CALL NUMBER(100.0+165.0+5.0+4VENA(0.0+3)
70 CALL NUMBER(100.0+130.0+5.0+RIGENT(0.0+3)
71 CALL NUMBER(100.0+135.0+5.0+RIGENT(0.0+3)
72 CALL NUMBER(100.0+120.0+5.0+DETAP2(0.0+3)
73 CALL NUMBER(100.0+105.0+5.0+TIM(0.0+3)
74 CALL NUMBER(100.0+90.0+5.0+PSISOR(0.0+3)
75 CALL NUMBER(100.0+75.0+5.0+RSUR(0.0+3)
76 CALL PLOT(200.0+0.0+3)
77 CALL FACTOR(0.6)
78 CALL SYMBOL(30.0+220.0+3.0+Z0M1 (MAGNETIC FLUX 10.0+20)
79 CALL SYMBOL(30.0+215.0+3.0+Z0M2 (LASHA CURRENT 10.0+20)
80 CALL SYMBOL(30.0+210.0+3.0+Z0M3 (LASHA PRESSURE 10.0+20)
81 CALL AATS(0.0+0.0+13MM (M) 1 200.0+13+130.0+0.0+13+13)
*
* RNC(1/2)+10.0)
82 CALL AATS(0.0+0.0+10MM+MAGNETIC FLUX (M) 10+200.0+90.0+10MM+11)
*
* PS(1/2)+10.0)
83 CALL AATS(135.0+0+20)CURRENT DENSITY (KA/10+2)+75.0+90.0)
*
* CC(1/1)+CC(1/2)+10.0)
84 CALL AATS(180.0+0+10MM)SSUR (1/2)+15.0+90.0)
*
* PRE(1/1)+PRE(1/2)+10.0)
85 CALL FLI=LN(1+PS(1/2)+10.0)
86 CALL PLOT(0.0+0+0)
87 CALL PLOT(100.0+0+0)
88 CALL FLI=LN(1+CC(1/1)+10.0)
89 CALL FLI=LN(1+PRE(1/1)+10.0)
90 CALL PLOT(200.0+0+999)
91 RETURN
92 END

```