

JAERI-M  
6734

Legendre陪函数展開を用いた  
自由境界MHD平衡の計算コード「SPHEX」

(JT-4 設計報告・IV)

1976年10月

関 省吾・前田 彦祐・狐崎晶雄・斎藤 龍太\*

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、お申しこしてください。

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.

Legendre 陪函数展開を用いた  
自由境界MHD平衡の計算コード「SPHEX」  
(JT-4 設計報告・Ⅳ)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部  
関 省吾, 前田 彦祐<sup>†</sup>, 狐崎 晶雄, 齋藤 龍太<sup>\*</sup>  
(1976年9月19日受理)

非円形断面トラス試験装置(JT-4)の平衡磁場コイル系の設計にあたり, 任意のプラズマ断面形状を有するシェルなトカマクのMHD平衡配位を求める必要がある。このため, 自由境界MHD平衡問題の解法をもとに数値計算コード「SPHEX」を作成した。この解法の特徴は, 磁束函数 $\Psi$ を球座標系で記述し, その天頂角成分についてLegendre 陪函数を用いて直交展開を行うことにより, 二次元偏微分方程式問題を一次元常微分方程式問題に帰着させることである。数値計算コードは, 逐次計算を用いて, 仮定したプラズマ境界に一致する平衡解 $\Psi$ を得る。このLegendre 陪函数展開を用いた自由境界MHD平衡の解法について説明し, 計算コードの概要と使用方法および計算例を示した。

---

<sup>†</sup> 日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

<sup>\*</sup> 外来研究員: 三菱電機株式会社

JEARI-M 6734

Numerical Code SPHEX for Free Boundary MHD Equilibrium  
with Legendre Expansion Method

Shogo SEKI, Hikosuke MAEDA<sup>+</sup>, Akio KITSUNEZAKI  
and  
Ryuta SAITO\*

Division of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

( Received September 19, 1976 )

A calculation method and its numerical code to solve the free-boundary problem of the toroidal MHD equilibrium are presented. The poloidal magnetic flux function  $\Psi$  is expressed with the orthogonal series of the first-order associated Legendre function in the spherical coordinates. This code is useful for the study of the MHD equilibrium in a shell-less tokamak with noncircular cross section.

---

+) Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

\*) On leave from Mitsubishi Electric Co. Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 計算方法 .....	1
3. 数値計算 .....	4
3-1 プラズマ電流分布の設定 .....	5
3-2 計算領域 .....	5
3-3 逐次計算および収束判定 .....	6
3-4 プラズマ境界の決め方 .....	7
3-5 初期値 .....	8
3-6 外部導体による磁束函数 .....	9
3-7 平衡諸量 .....	10
3-8 計算結果のチェック .....	11
4. コード使用法 .....	12
4-1 入力形式およびその内容 .....	12
4-2 計算例 .....	15
4-3 計算時間および精度 .....	15
5. おわりに .....	15
参考文献 .....	15
付 録 .....	17

## 1. はじめに

現在、日本原子力研究所において設計研究中の非円形断面トーラス試験装置(JT-4)の平衡磁場コイル系の設計にあたって、任意のプラズマ断面形状を有する“シュルレストカマク”のMHD平衡配位を求めることが必要である。そのため、Feneberg, Lackner<sup>1)</sup>により提案された軸対称トロイダルプラズマの自由境界MHD平衡問題の解法を基にMHD平衡数値計算コード「SPHEX」を作成したので報告する。

この解法の特徴は、平衡配位を記述する磁束函数 $\Psi$ を球座標系で書下し、変数分離法によりその天頂角成分についてLegendre陪函数を用いて直交展開を行うことである。この方法により、一般的には二次元偏微分方程式で記述される軸対称トロイダルプラズマのMHD平衡問題は、一次元常微分方程式問題に帰着する。数値計算コードでは、プラズマ電流分布を関数形で与えて、この一次元常微分方程式から磁束函数 $\Psi$ を求め、次に求められた等磁束面と仮定したプラズマ境界とが一致するまで逐次計算を繰返す。プラズマ境界の仮定の仕方には任意性が残るが、本コードでは空間に固定した座標点を与え、その点を通る等磁束面を新たなプラズマ境界と考えるとその内部にプラズマ電流を流し逐次近似計算を進める方法をとる。

次節では、Legendre陪函数展開を用いた自由境界MHD平衡の解法について説明する。第3節では、数値計算コードの概要を、第4節で、本コードの使用法および計算例を示す。また、本コードのリストおよびシンボルテーブルを付録に載せる。

## 2. 計算方法

軸対称トロイダルプラズマのMHD平衡は、良く知られているポロイダル磁束函数 $\Psi$ に関する二次元二階偏微分方程式で記述できる<sup>\*</sup>。その方程式は、円柱座標系( $R, \phi, Z$ )では、次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \left( \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -\mu_0 R j_\phi \quad (2-1)$$

ここで、 $\mu_0$ は透磁率、 $j_\phi$ はプラズマ中を流れるトロイダル電流密度である。この電流密度 $j_\phi$ は、平衡の式 $\nabla P = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ から、次の様な関数形を持つことが知られている。

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

ただし、 $P(\Psi)$ はプラズマ圧力、 $I(\Psi)$ はポロイダル電流の流れ函数である。この時、磁場および電流は、この $\Psi$ および $I(\Psi)$ を用いて、次の様に表わされる。

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

\*  $\Psi(R, Z) \equiv R \cdot A_\phi(R, Z)$

( $A_\phi(R, Z)$ :ベクトルポテンシャルの $\phi$ 方向成分)

## 1. はじめに

現在、日本原子力研究所において設計研究中の非円形断面トーラス試験装置(JT-4)の平衡磁場コイル系の設計にあたって、任意のプラズマ断面形状を有する“シュルレストカマク”のMHD平衡配位を求めることが必要である。そのため、Feneberg, Lackner<sup>1)</sup>により提案された軸対称トロイダルプラズマの自由境界MHD平衡問題の解法を基にMHD平衡数値計算コード「SPHEX」を作成したので報告する。

この解法の特徴は、平衡配位を記述する磁束函数 $\Psi$ を球座標系で書下し、変数分離法によりその天頂角成分についてLegendre陪函数を用いて直交展開を行うことである。この方法により、一般的には二次元偏微分方程式で記述される軸対称トロイダルプラズマのMHD平衡問題は、一次元常微分方程式問題に帰着する。数値計算コードでは、プラズマ電流分布を関数形で与えて、この一次元常微分方程式から磁束函数 $\Psi$ を求め、次に求められた等磁束面と仮定したプラズマ境界とが一致するまで逐次計算を繰返す。プラズマ境界の仮定の仕方には任意性が残るが、本コードでは空間に固定した座標点を与え、その点を通る等磁束面を新たなプラズマ境界と考慮してその内部にプラズマ電流を流し逐次近似計算を進める方法をとる。

次節では、Legendre陪函数展開を用いた自由境界MHD平衡の解法について説明する。第3節では、数値計算コードの概要を、第4節で、本コードの使用方法および計算例を示す。また、本コードのリストおよびシンボルテーブルを付録に載せる。

## 2. 計算方法

軸対称トロイダルプラズマのMHD平衡は、良く知られているポロイダル磁束函数 $\Psi$ に関する二次元二階偏微分方程式で記述できる\*。その方程式は、円柱座標系( $R, \phi, Z$ )では、次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \left( \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -\mu_0 R j_\phi \quad (2-1)$$

ここで、 $\mu_0$ は透磁率、 $j_\phi$ はプラズマ中を流れるトロイダル電流密度である。この電流密度 $j_\phi$ は、平衡の式 $\nabla P = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ から、次の様な関数形を持つことが知られている。

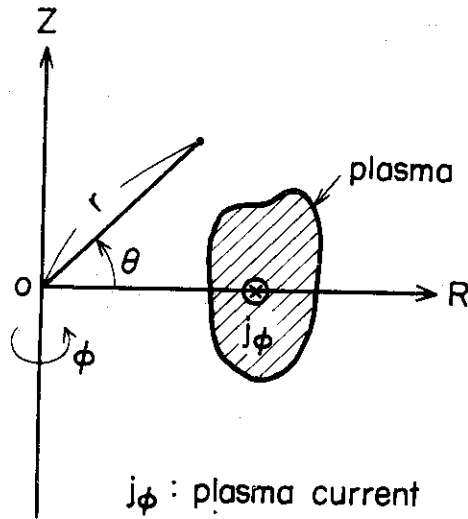
$$j_\phi = R \frac{dP(\Psi)}{d\Psi} + \frac{1}{2R} \frac{dI^2(\Psi)}{d\Psi} \quad (2-2)$$

ただし、 $P(\Psi)$ はプラズマ圧力、 $I(\Psi)$ はポロイダル電流の流れ函数である。この時、磁場および電流は、この $\Psi$ および $I(\Psi)$ を用いて、次の様に表わされる。

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

\*  $\Psi(R, Z) \equiv R \cdot A_\phi(R, Z)$  ( $A_\phi(R, Z)$ : ベクトルポテンシャルの $\phi$ 方向成分)

$$j_R = -\frac{1}{\sqrt{\mu_0} R} \frac{\partial I}{\partial Z}, \quad j_Z = \frac{1}{\sqrt{\mu_0} R} \frac{\partial I}{\partial R} \quad (2-3)$$



第1図 座標系：円柱座標 (R, phi, Z), 球座標 (r, phi, theta)

ここで、ポロイダル磁束函数Psiを

$$\Psi \equiv \Psi_P + \Psi_0 \quad (2-4)$$

と書き、Psi\_P はプラズマ電流による磁束函数、Psi\_0 は外部導体に流れる電流による磁束函数を表わすものとする。すると、Psi\_0 は、線電流近似を用いると次式で与えられる：

$$\Psi_0(R, Z) = \sum_j \frac{\mu_0 I_j}{\pi} \frac{\sqrt{RR_j}}{k_j} \left\{ \left(1 - \frac{k_j^2}{2}\right) K(k_j) - E(k_j) \right\} \quad (2-5)$$

$$k_j^2 \equiv \frac{4R \cdot R_j}{(R+R_j)^2 + (Z-Z_j)^2}$$

ここで、外部導体の位置を (R\_j, Z\_j), その導体に流れているトロイダル方向電流を I\_j とした。また、K(k), E(k) はそれぞれ第一種および第二種の完全楕円函数である。一方、プラズマ電流によるポロイダル磁束函数 Psi\_P は、(2-1)(2-2)より次の様になる。

$$L\Psi_P = Q(\Psi_P + \Psi_0) \cdot f(R, \Psi_P + \Psi_0) \quad (2-6)$$

ただし、

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

$$f(R, \Psi_P + \Psi_0) \equiv -\mu_0 R \cdot j_\phi(R, \Psi_P + \Psi_0)$$

$$Q(\Psi) = \begin{cases} 1 & \text{for } \Psi \geq \Psi_0 \quad (\text{プラズマ内}) \\ 0 & \text{for } \Psi < \Psi_0 \quad (\text{プラズマ外}) \end{cases}$$

ここで、Psi\_0 はプラズマ表面を表わす磁束函数である。

偏微分方程式(2-6)を、球座標系 (r, phi, theta) に於て書下すと、次式になる：

$$\frac{\partial^2 \Psi_P}{\partial r^2} + \frac{1-x^2}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_P}{\partial x^2} = Q(\Psi_P + \Psi_0) \cdot f(r \sqrt{1-x^2}, \Psi_P + \Psi_0) \quad (2-7)$$



ただし  $R = r \cos \theta = r \sqrt{1-x^2}$  ( $x \equiv \sin \theta$ )  
 $Z = r \sin \theta = r x$

非線形二階偏微分方程式 (2-7) の境界条件は、次の通りである。

- (i)  $r \rightarrow 0, r \rightarrow \infty$  で  $\Psi_p \rightarrow 0$
- (ii)  $x = \pm 1$  で  $\Psi_p = 0$  (2-8)
- (iii) プラズマ表面で  $\Psi = \Psi_p + \Psi_0$  は一定 ( $\Psi = \Psi_0$ )

次に、方程式 (2-7) を変数分離法を用いて解く。この時、 $\Psi_p$  の角度成分 ( $-1 \leq x \leq 1$ ) については適当な直交関数系  $\{G_\nu(x)\}$  によって展開する：

$$\Psi_p \equiv \sum_\nu C_\nu(r) \sqrt{1-x^2} G_\nu(x) \quad (2-9)$$

(2-9) を (2-7) に代入すると、(2-7) の右辺は、直交関数  $\{G_\nu(x)\}$  で展開して次の様に見える。

$$(2-7) \text{ の右辺} = \sum_\nu g_\nu(r) \sqrt{1-x^2} G_\nu(x) \quad (2-10)$$

(2-7) の左辺は、

$$\sum_\nu \sqrt{1-x^2} \left\{ G_\nu(x) \frac{d^2 C_\nu(r)}{dr^2} + \frac{C_\nu(r)}{r^2} \left[ (1-x^2) G_\nu''(x) - 2x G_\nu'(x) - \frac{G_\nu(x)}{1-x^2} \right] \right\} \quad (2-11)$$

となる。故に (2-10) (2-11) より (2-7) を満たす磁場函数  $\Psi_0$  を直交関数系  $\{G_\nu(x)\}$  で直交展開できるためには、 $\{G_\nu(x)\}$  は次の条件を満たす必要がある。

$$(1-x^2) G_\nu''(x) - 2x G_\nu'(x) - \frac{1}{1-x^2} G_\nu(x) = \text{const.} \times G_\nu(x) \quad (2-12)$$

しかるに、第一種の一位 Legendre 陪函数  $P_n^1(x)$  は、次式を満たす<sup>2)</sup>

$$(1-x^2) \frac{d^2}{dx^2} P_n^1(x) - 2x \frac{d}{dx} P_n^1(x) - \frac{1}{1-x^2} P_n^1(x) = -n(n+1) P_n^1(x) \quad (2-13)$$

したがって、 $\{G_\nu(x)\}$  として Legendre 陪函数系  $\{P_n^1(x)\}$  を採用すれば (2-10), (2-11) より (2-7) は次式となる。

$$\sum_n \left\{ P_n^1(x) \frac{d^2 C_n(r)}{dr^2} - n(n+1) \frac{C_n(r)}{r^2} P_n^1(x) \right\} = \sum_n g_n(r) P_n^1(x) \quad (2-14)$$

( $n=1, 2, 3, \dots$ )<sup>\*</sup>

故に、 $\{P_n^1(x)\}$  の直交性より、 $C_n(r)$  は、次式を満たす。

$$\frac{d^2}{dr^2} C_n(r) - \frac{n(n+1)}{r^2} C_n(r) = g_n(r) \quad (2-15)$$

二階常微分方程式 (2-15) は、容易に解ける。すなわち、(2-15) の右辺を零とした齊次方程式の独立解は、 $r^{n+1}$ ,  $r^{-n}$  であるから、(2-15) の一般解は、境界条件 (2-8) の (i) を考慮すると次の様になる ((2-8) の (ii) は、 $P_n^1(\pm 1) = 0$  より自動的に満たされている)：

\*  $P_0^1(x) = 0$ ,  $P_{-n-1}^1(x) = P_n^1(x)$  より,  $n=1, 2, 3, \dots$

$$C_n(r) = -r^{n+1} \int_r^\infty \frac{\rho^{-n}}{2n+1} g_n(\rho) d\rho - r^{-n} \int_0^r \frac{\rho^{n+1}}{2n+1} g_n(\rho) d\rho \quad (2-16)$$

結局、境界条件(2-8)の(i)および(ii)を満たす方程式(2-7)の解として、次式を得る。

$$\begin{aligned} \Psi_P(r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \left[ -r^{n+1} \int_r^\infty \rho^{-n} g_n(\rho) d\rho - r^{-n} \int_0^r \rho^{n+1} g_n(\rho) d\rho \right] \\ \times \sqrt{1-x^2} P_n^1(x) \quad (2-17) \\ (n=1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

ここで

$$g_n(r) \equiv \frac{2n+1}{2n(n+1)} \int_{-1}^1 \frac{P_n^1(x)}{\sqrt{1-x^2}} Q(\Psi_P + \Psi_0) \cdot f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi_P + \Psi_0) dx \quad (2-18)^*$$

また、 $Z=0$ の面に関して上下対称性がある場合：

$$\Psi(r, x) = \Psi(r, -x)$$

故に

$$\begin{aligned} Q(\Psi(r, x)) &= Q(\Psi(r, -x)) \\ f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi(r, x)) &= f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi(r, -x)) \end{aligned}$$

には、 $P_n^1(-x) = (-1)^{n+1} P_n^1(x)$  を用いて、(2-17)および(2-18)は、次の様になる。

$$\begin{aligned} \Psi_P(r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4n-1} \left[ -r^{2n} \int_r^\infty \rho^{-2n+1} g_{2n-1}(\rho) d\rho - r^{-2n+1} \int_0^r \rho^{2n} g_{2n-1}(\rho) d\rho \right] \\ \times \sqrt{1-x^2} P_{2n-1}^1(x) \quad (2-19) \\ (n=1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

$$g_{2n-1}(r) = \frac{4n-1}{2n(2n-1)} \int_0^1 \frac{P_{2n-1}^1(x)}{\sqrt{1-x^2}} Q(\Psi_P + \Psi_0) \cdot f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi_P + \Psi_0) dx \quad (2-19')$$

### 3. 数 値 計 算

(2-19), (2-19') から境界条件(2-8)の(iii)を満たす解を求めるために、数値的逐次計算を行う。そのため、空間 $(r, x)$ を格子化して、磁束函数 $\Psi_P(r, x)$ としては各格子点での値 $\Psi_P(r_i, x_j)$ を求める。また、プラズマ電流分布としては、一様分布および放物線状分布を考える。

\*  $\int_{-1}^1 P_m^1(x) P_n^1(x) dx = \frac{2n(n+1)}{2n+1} \delta_{mn}$

を用いて(2-10)の両辺に $(1-x^2)^{-\frac{1}{2}} P_n^1(x)$ を乗じて、 $x=-1 \sim 1$ で積分することにより求まる。

$$C_n(r) = -r^{n+1} \int_r^\infty \frac{\rho^{-n}}{2n+1} g_n(\rho) d\rho - r^{-n} \int_0^r \frac{\rho^{n+1}}{2n+1} g_n(\rho) d\rho \quad (2-16)$$

結局、境界条件(2-8)の(i)および(ii)を満たす方程式(2-7)の解として、次式を得る。

$$\begin{aligned} \Psi_P(r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \left[ -r^{n+1} \int_r^\infty \rho^{-n} g_n(\rho) d\rho - r^{-n} \int_0^r \rho^{n+1} g_n(\rho) d\rho \right] \\ \times \sqrt{1-x^2} P_n^1(x) \quad (2-17) \\ (n=1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

ここで

$$g_n(r) \equiv \frac{2n+1}{2n(n+1)} \int_{-1}^1 \frac{P_n^1(x)}{\sqrt{1-x^2}} Q(\Psi_P + \Psi_0) \cdot f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi_P + \Psi_0) dx \quad (2-18)^*$$

また、 $Z=0$ の面に関して上下対称性がある場合：

$$\Psi(r, x) = \Psi(r, -x)$$

故に

$$\begin{aligned} Q[\Psi(r, x)] &= Q[\Psi(r, -x)] \\ f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi(r, x)) &= f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi(r, -x)) \end{aligned}$$

には、 $P_n^1(-x) = (-1)^{n+1} P_n^1(x)$  を用いて、(2-17)および(2-18)は、次の様になる。

$$\begin{aligned} \Psi_P(r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4n-1} \left[ -r^{2n} \int_r^\infty \rho^{-2n+1} g_{2n-1}(\rho) d\rho - r^{-2n+1} \int_0^r \rho^{2n} g_{2n-1}(\rho) d\rho \right] \\ \times \sqrt{1-x^2} P_{2n-1}^1(x) \quad (2-19) \\ (n=1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

$$g_{2n-1}(r) = \frac{4n-1}{2n(2n-1)} \int_0^1 \frac{P_{2n-1}^1(x)}{\sqrt{1-x^2}} Q(\Psi_P + \Psi_0) \cdot f(r\sqrt{1-x^2}, \Psi_P + \Psi_0) dx \quad (2-19')$$

### 3. 数 値 計 算

(2-19), (2-19') から境界条件(2-8)の(iii)を満たす解を求めるために、数値的逐次計算を行う。そのため、空間 $(r, x)$ を格子化して、磁束函数 $\Psi_P(r, x)$ としては各格子点での値 $\Psi_P(r_i, x_j)$ を求める。また、プラズマ電流分布としては、一様分布および放物線状分布を考える。

\*  $\int_{-1}^1 P_m^1(x) P_n^1(x) dx = \frac{2n(n+1)}{2n+1} \delta_{mn}$

を用いて(2-10)の両辺に $(1-x^2)^{-\frac{1}{2}} P_n^1(x)$ を乗じて、 $x=-1 \sim 1$ で積分することにより求まる。

## 3-1. プラズマ電流分布の設定

プラズマ電流分布は、次の様に与える。

$$j_{\phi} = R \frac{dP(\Psi)}{d\Psi} + \frac{1}{R} \frac{d}{d\Psi} \left( \frac{I^2(\Psi)}{2} \right)$$

$$= r \sqrt{1-x^2} \left[ p_1 + p_2 \cdot (\Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C) \right] + \frac{1}{r \sqrt{1-x^2}} \left[ I_1 + I_2 \cdot (\Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C) \right]$$

(3-1)

ここで、 $p_1, p_2, I_1, I_2$  は定数である。全プラズマ電流  $I_P$  は、(3-1) をプラズマ領域に渡って積分することにより得られる：

$$I_P \equiv \int_{\text{plasma}} j_{\phi} dS$$

$$= p_1 \int r \sqrt{1-x^2} dS_P + p_2 \int r \sqrt{1-x^2} \cdot (\Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C) dS_P$$

$$+ I_1 \int \frac{dS_P}{r \sqrt{1-x^2}} + I_2 \int \frac{\Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C}{r \sqrt{1-x^2}} dS_P \quad (3-2)$$

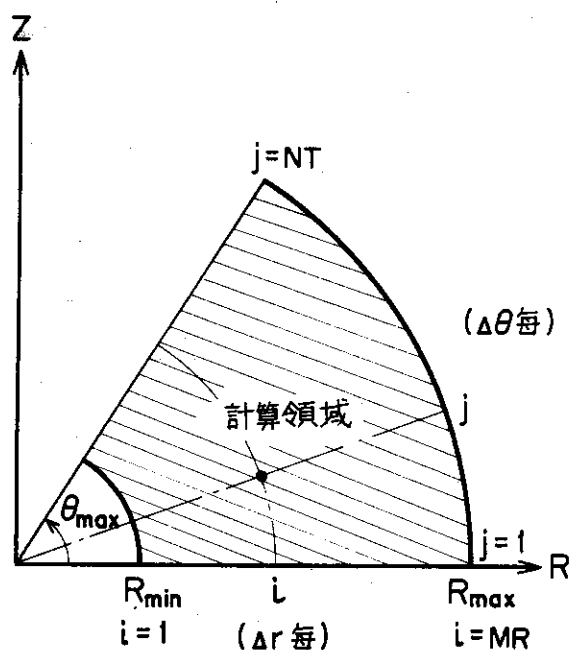
プラズマ電流密度を(3-1)の如く設定すると、(2-19')の被積分関数内の  $f$  は、次の様になる。

$$f(r \sqrt{1-x^2}, \Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C; I_1, I_2, p_1, p_2)$$

$$= - \left[ I_1 + I_2 \cdot (\Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C) \right] - r^2 (1-x^2) \left[ p_1 + p_2 \cdot (\Psi_P + \Psi_0 - \Psi_C) \right] \quad (3-3)$$

## 3-2. 計算領域

計算すべき空間領域としては、解の上下対称性を仮定して、 $Z=0$  面に関して上半面のみで充分である。また、(2-19), (2-19') より積分に関与するのはプラズマの存在する領域、すなわち、 $Q(\Psi_P + \Psi_0) = 1$  なる領域であるから、第2図の様に  $[R_{\min}, R_{\max}]$  および  $[0, \theta_{\max}]$  の領域で充分である。ただし、求まった解  $\Psi_P$  から決定されるプラズマは、同図の斜線部内に存在しなければならない。この計算領域を格子化して数値計算を行う。



第2図 計算領域

3-3 逐次計算および収束判定

(2-19), (2-19')より逐次計算を境界条件(2-8)の(iii)が満足されるまで繰返す。この時, Legendre 陪函数  $P_n^1(x)$  としては, 公式;

$$P_n^1(x) = -\sqrt{1-x^2} \frac{d}{dx} P_n(x) \equiv -\sqrt{1-x^2} \dot{P}_n(x) \tag{3-4}$$

$$\dot{P}_n(x) = \frac{n+1}{x^2-1} [P_{n+1}(x) - x P_n(x)]$$

を用いて計算する。 $P_n(x)$ は, Legendre 函数である。

(2-19), (2-19')より, 第  $(\ell+1)$  回目の逐次計算により求まる磁束函数  $\Psi_P^{\ell+1}(r_i, x_j)$  は, 次の様になる。

$$\Psi_P^{\ell+1}(r_i, x_j) = \sum_{n=1}^{JMAX} \frac{-1}{4n-1} \left[ r_i^{2n} \int_{r_i}^{R_{max}} \frac{g_{2n-1}^{\ell}(\rho)}{\rho^{2n-1}} d\rho + \frac{1}{r_i^{2n-1}} \int_{R_{min}}^{r_i} \rho^{2n} g_{2n-1}^{\ell}(\rho) d\rho \right] \times (1-x_j^2) \dot{P}_{2n-1}(x_j) \tag{3-5}$$

ここで,

$$g_{2n-1}^{\ell}(r) = \frac{4n-1}{2n(2n-1)} \int_0^{x_{max}} \dot{P}_{2n-1}(x) \cdot Q(\Psi_P^{\ell} + \Psi_0 - \Psi_C^{\ell}) \cdot f^{\ell}(r \sqrt{1-x^2}, \Psi_P^{\ell} + \Psi_0 - \Psi_C^{\ell}) \cdot dx$$

$$f^{\ell}(r \sqrt{1-x^2}, \Psi_P^{\ell} + \Psi_0 - \Psi_C^{\ell}) \equiv f(r \sqrt{1-x^2}, \Psi_P^{\ell} + \Psi_0 - \Psi_C^{\ell}; I_1^{\ell}, I_2^{\ell}, p_1^{\ell}, p_2^{\ell})$$

$$x_{max} \equiv \sin \theta_{max}$$

この数値計算コードでは, 逐次計算のたび毎に(3-2)に基づいてプラズマ電流  $I_P^{\ell}$  を求

ゆる：

$$I_P^\ell = I_1^\ell \cdot S_1^\ell + I_2^\ell \cdot S_2^\ell + p_1^\ell \cdot S_3^\ell + p_2^\ell \cdot S_4^\ell \quad (3-6)$$

ここで

$$S_1^\ell = \int \frac{Q(\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell)}{r \sqrt{1-x^2}} \cdot dS$$

$$S_2^\ell = \int \frac{Q(\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell)}{r \sqrt{1-x^2}} \cdot (\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell) \cdot dS$$

$$S_3^\ell = \int r \sqrt{1-x^2} \cdot Q(\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell) \cdot dS$$

$$S_4^\ell = \int r \sqrt{1-x^2} \cdot Q(\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell) \cdot (\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell) \cdot dS$$

求めた  $I_P^\ell$  と所定のプラズマ電流  $I_{P0}$  とを比較して、プラズマ電流が  $I_{P0}$  になる様に各定数を補正する。

$$I_1^{\ell+1} = \frac{I_{P0}}{I_P^\ell} I_1^\ell, \quad I_2^{\ell+1} = \frac{I_{P0}}{I_P^\ell} I_2^\ell, \quad p_1^{\ell+1} = \frac{I_{P0}}{I_P^\ell} p_1^\ell, \quad p_2^{\ell+1} = \frac{I_{P0}}{I_P^\ell} p_2^\ell \quad (3-7)$$

プラズマ表面を表わす磁束函数  $\Psi_C^\ell$  としては、空間内の一点  $(r_0, x_0)$  (決定法については後述) を通る等磁束面を  $\Psi_P^\ell + \Psi_0$  より求め、その値を  $\Psi_C^\ell$  とする；

$$\Psi_C^\ell = \Psi_P^\ell(r_0, x_0) + \Psi_0(r_0, x_0) \quad (3-8)$$

この  $\Psi_C^\ell$  を用いて、 $Q(\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell)$  を決める；

$$Q(\Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell) = \begin{cases} 1 & ; \Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell \geq 0 \\ 0 & ; \Psi_P^\ell + \Psi_0 - \Psi_C^\ell < 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

以上の逐次計算を繰返して、 $\Psi_P^{\ell+1}$  と  $\Psi_P^\ell$  とが全格子点で等しくなれば、 $\Psi_P^{\ell+1}$  は境界条件 (2-8) を満たす (2-7) の解である。この数値計算コードでは、計算領域内の全格子点で

$$\left| \frac{\Psi_P^{\ell+1}(r_i, x_j) - \Psi_P^\ell(r_i, x_j)}{\Psi_P^\ell(r_i, x_j)} \right| < \varepsilon \quad (3-10)$$

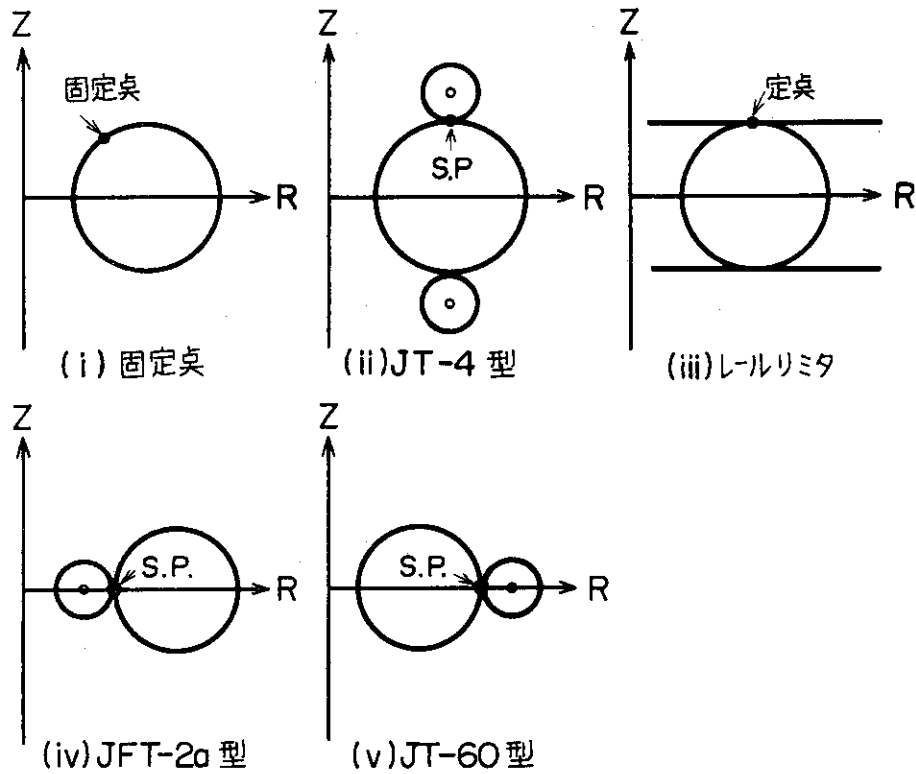
を満足することを収束判定条件としている。

### 3-4 プラズマ境界の決め方

本コードでは、プラズマ表面を規定する磁束函数  $\Psi_C^\ell$  を求めるために、計算空間内に定点を与える必要がある。そこで、本コードでは入力オプションにより次の5通りの場合を考える。

- (i) 計算領域内の任意の一点を固定する (固定点)
- (ii) JT-4 型の上下磁気リミタのある場合、定点を固定せずセパトリックス面をプラズマ表面にする。この場合、逐次計算のたび毎に  $\Psi_P^\ell + \Psi_0$  により stagnation point (S.P.) を見つけて定点とする (JT-4 型)
- (iii) 上下に R 軸平行なレール板リミタがある場合、 $\Psi_P^\ell + \Psi_0$  から決まる等磁束面とレールリミタとの接点を定点とする (レールリミタ)
- (iv) JFT-2a 型の内側磁気リミタのある場合、(ii) と同様にする (JFT-2a 型)

(V) JT-60型の外側磁気リミタのある場合, (ii)と同様にする(JT-60型)



第3図 プラズマ境界の設定法

### 3-5 初期値

逐次計算(3-5)を実行するための初期値は, 次の様に与える。平衡計算の結果から得られるトロイダルプラズマの平衡諸量の期待値を

$a_{P0}$  : プラズマの平均副半径

$R_{P0}$  : " 主半径

$I_{P0}$  : " トロイダル電流

$\beta_{P0}$  : 一様分布プラズマ電流時のポロイダルベータ ( $\gamma = 0$ )

$\beta'_{P0}$  : 放物型分布プラズマ電流時のポロイダルベータ ( $\gamma = 1.0$ )

$\gamma$  : 0 ~ 1.0 の任意の値

とすると,

$$I_1^0 = \frac{I_{P0}}{\pi a_{P0}^2} R_{P0} (1 - \beta_{P0}) (1 - \gamma)$$

$$I_2^0 = \frac{16}{3 \mu_0 a_{P0}^2} (1 - \beta'_{P0}) \gamma \quad (3-11)$$

$$P_1^0 = \frac{I_{P0}}{\pi a_{P0}^2 R_{P0}} \beta'_{P0} \gamma (1 - \gamma)$$

$$P_2^0 = \frac{16}{3\mu_0 a_{P0}^2 R_{P0}^2} \beta_{P0}' r$$

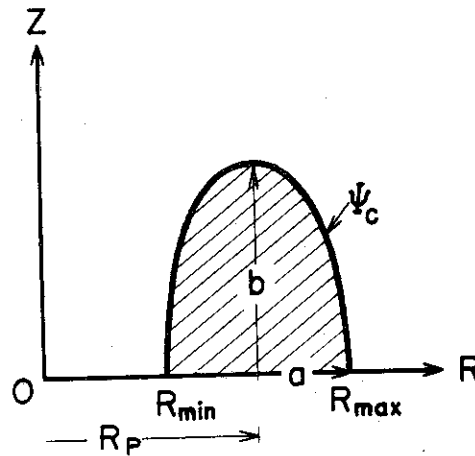
で与える。

また、プラズマ電流の作る磁束関数の初期値  $\Psi_P^0$  としては、 $(R, Z) = (R_{P0}, 0)$  に等価線電流  $I_{P0}$  を置いた場合の磁束関数で与える；

$$\Psi_P^0(R, Z) = \frac{\mu_0 I_{P0}}{\pi} \frac{\sqrt{R \cdot R_{P0}}}{k} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\} \quad (3-12)$$

$$k^2 \equiv \frac{4R \cdot R_{P0}}{(R + R_{P0})^2 + Z^2}$$

プラズマ領域の初期値  $Q(\Psi_P^0 + \Psi_0 - \Psi_C^0)$  としては、主半径  $R_{P0}$ 、副半径  $a_{P0}$  の円形断面プラズマを想定して与える。



第4図 プラズマの磁束関数  $\Psi_P$ 、および  $Q(\Psi)$  の初期値

### 3-6 外部導体による磁束関数

外部導体による磁束関数  $\Psi_0$  は、外部導体の位置  $(R_j, Z_j)$  および電流  $I_j$  から、円環状線電流近似を用いて(2-5)の様に与えられる。本コードでは、外部導体系を2つに分類して入力することができる。

#### (i) ISHAPコイル

入力形式は、導体の位置  $(R_j, Z_j)$  と電流  $I_j$  であり、(2-5)に従って磁束関数を計算する。

#### (ii) IVERTコイル

入力形式は、導体の位置  $(R_j, Z_j)$  と電流  $I_j$  であるが、この場合、電流  $I_j$  としては、IVERTコイル相互間の電流比を入力すればよい。コード内にて電流  $I_j$  の値は、IVERTコイルがプラズマ中心に印加する垂直磁場  $B_{\perp 0}$  が、

$$B_{\perp 0} = \frac{\mu_0 I_{P0}}{4\pi R_{P0}} \left\{ \ell_n \frac{8R_{P0}}{a_{P0}} + \frac{\ell_i - 3}{2} + \beta_{P0} \right\} \quad (3-13)$$

$$\ell_i = \frac{1}{2} (r+1)$$



になる様に自動的に決定される。また、ISHAPコイルとIVERTコイルが同時に入力される場合は、両コイルがプラズマ中心に印加する垂直磁場が(3-13)で与えられる様にIVERTコイルの電流が決められる。

### 3-7 平衡諸量

逐次計算が収束した場合、得られた $\Psi_P^{\ell+1}$ よりプラズマの平衡量として次の諸量が出力される。

(i) プラズマの主半径  $R_P$

求まった $\Psi_P^{\ell+1} + \Psi_0$ と $\Psi_C^{\ell}$ とから、第5図に示す様な $R_{min}$ と $R_{max}$ とを求め

$$R_P = \frac{R_{min} + R_{max}}{2}$$

で与える。

(ii) プラズマの平均副半径  $a_P$

〃 R軸小半径  $a$

〃 Z軸小半径  $b$

後述するプラズマ断面積 $S$ より

$$a_P = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad a = R_P - R_{min}, \quad b = \frac{S}{\pi a}$$

で与える。

(iii) プラズマのアスペクト比  $R_P/a_P$

〃 楕円度  $b/a$

(iv) 磁気軸の主半径  $R_{MA}$

求まった $\Psi_P^{\ell+1} + \Psi_0$ がR軸上で最大値をとる位置を $R_{MA}$ とする。

(v) プラズマ電流  $I_P$

(vi) プラズマ断面積  $S = \Sigma \Delta S$

プラズマ容積  $V = \Sigma 2\pi R \Delta S$

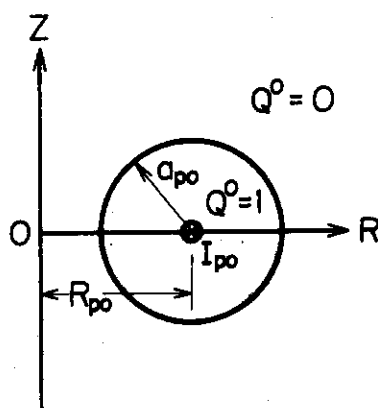
(vii) ポロイダルベータ  $\beta_P$

$$\beta_P \equiv \frac{\bar{p}}{B_a^2 / 2\mu_P} = \frac{8\pi}{\mu_0 I_P^2} \int_{plasma} P(\Psi) dS$$

(3-1)より

$$\begin{aligned} P(\Psi) &= \int_{\Psi_C}^{\Psi} \frac{dP(\Psi)}{d\Psi} d\Psi = \int_{\Psi_C}^{\Psi} (p_1 + p_2 \Psi) d\Psi \\ &= p_1 (\Psi - \Psi_C) + \frac{p_2}{2} (\Psi^2 - \Psi_C^2) \end{aligned}$$

ここで、 $\Psi \equiv \Psi_P + \Psi_0$ である。



第5図 MHD平衡プラズマの諸量

3-8 計算結果のチェック

逐次計算が収束した場合、得られた解のチェックは、(2-10)および(3-5)より次の様にして行い。

逐次計算が収束した場合、得られた解  $\Psi_P^{l+1}$  は  $\Psi_P^l$  と収束条件(3-10)の範囲で一致しているので、 $\Psi_P^l$  を用いて  $g_{2n-1}^l(r_i)$  を計算する：

$$g_{2n-1}^l(r_i) = \frac{4n-1}{2n(2n-1)} \int_0^{x_{max}} \dot{P}_{2n-1}(x) \cdot Q(\Psi_P^l + \Psi_0 - \Psi_0^l) \cdot f^l(r_i, \sqrt{1-x^2}, \Psi_P^l + \Psi_0 - \Psi_0^l) \cdot dx$$

これを(2-10)に代入して得られる量  $F(r_i, x_j)$ ：

$$F(r_i, x_j) \equiv - \sum_{n=1}^{JMAX} g_{2n-1}^l(r_i) \cdot (1-x_j^2) \dot{P}_{2n-1}(x_j) \tag{3-14}$$

は、与えられた方程式(2-7)の右辺になっているはずである。この量  $F$  と方程式(2-7)の右辺  $f^l(r, \sqrt{1-x^2}, \Psi_P^l + \Psi_0 - \Psi_0^l)$  とを比較して、相対誤差  $E(r_i, x_j)$ ；

$$E(r_i, x_j) \equiv \left| \frac{F-f^l}{f^l} \right| \tag{3-15}$$

を各格子点で出力してチェックする。

以上、数値計算コードの概要を述べた。第6図に本コードのフローチャートを示す\*

\* 詳細なフローチャートは別に用意されているので、必要な方は筆者まで連絡して頂きたい。

## 4. コード使用法

## 4-1 入力形式およびその内容

カード1 タイトル (18A4)

TITL(18)

カード2 MT入出力オプション (4I5)

ITAPE1 初期データ入力オプション

= 0 MTより読込まない

= 1 MTより読込む

ITAPE2 計算途中データ出力オプション

= 0 MTに書込まない

= 1 MTに書込む

ISTP MT入力により計算再開時の逐次計算反復数

LMAX 逐次計算の最大反復回数

以降は ITAPE1 = 0 の時必要 (通常の場合)

カード3 計算領域, 収束条件 (4E10.5)

RMIN  $R_{\min}(m)$  (第2図参照)

RMAX  $R_{\max}(m)$

THETAO  $\theta_{\max}(\text{deg.})$

EPS 逐次計算収束判定用許容値 (3-10) 参照

カード4 格子数, 出力オプション (5I5)

MR  $r$  方向格子数 ( $\leq 40$ )\* (第2図参照)

NT  $\theta$  方向格子数 ( $\leq 40$ )\*

NUMAX Legendre 陪函数展開の最高次数 ( $\leq 60$ )\*

IPRT 逐次計算途中,  $\Psi_p^l$  出力オプション

= 0 出力なし

= 1 反復毎に出力する

ITST 逐次計算途中,  $g_{\nu}^{-1}((2-19))$  のチェック・オプション

= 0 反復毎にチェックしない

= 1 相対誤差  $E((3-15))$  を反復毎に計算出力する

= 2 相対誤差  $E$  および逆関数  $g_{\nu}^{-1}$  を反復毎に計算出力する

\* 付録に載せた本コードリストでは, 最大値をこの様に定めているが, 必要な場合, メインプログラムにて設定変更は可能である。



A I P	プラズマ電流 $I_{p0}$ (A)
B E T A P	プラズマ $\beta_p$ ( $r = 0$ 時)
B E T A D	" ( $r = 1$ 時)
G A M M A	プラズマ電流分布 $r$
	$r = 0$ : 一様分布
	$r = 1$ : 放物形分布

カード 8 外部導体本数 ( 2 I 5 )

I S H A P	外部導体の内 電流値を固定にしたもの ( eg. ダイバータ・コイル ) の上半面の本数
I V E R T	外部導体の内, 電流を ( 3 - 1 3 ) に基づき自動的に変動できるものの上半面の本数

$$( I S H A P + I V E R T \leq 1 0 0 )$$

( 注, 下半面については, 上下対称と考えて, コード内で自動的に処理する。したがって,  $Z = 0$  上に存在するコイルについては, その電流値を  $1/2$  にして入力すべし )

カード 9 垂直磁場  $B_{L0}$  補正係数 ( E 1 0 . 5 )

C O R E C T ( 3 - 1 3 ) で与えられる  $B_{L0}$  にこの値を乗じた値を改めて  $B_{L0}$  として I V E R T コイルの電流を決める。

カード 10 外部導体の位置 電流 ( 上半面分のみ ) ( 3 F 1 0 . 0 )

A I	外部コイルの位置 R座標 (m)
Z I	" Z座標 (m)
J I	" 電流 (KA)

注 1 I S H A P, I V E R T の順に ( I S H A P + I V E R T ) 枚必要。

注 2 I V E R T 分に関しては その電流 J I は, 各コイル間の巻数比を入力する。

注 3 L M T T R = 2, 4, 5 の時 ダイバータ ( 磁気リミタ ) 主コイルが最初にくる。

カード 11 等高線用データ ( I P L T = 2, 3 の時のみ必要 ) ( F 1 0 . 0, I 5 )

A X F R	J G P C P にて 等高線を描く時の 軸長スケールファクタ ( units/cm )
I C T A	センタ・マーク ( + ) オプション
	= 1 センタ・マーク書く
	= 2 センタ・マーク書かない

( 注意 )

本コードにおけるプロッタ出力は, グラフィック COM を用いてある。また J G P C P にて 等高線を描く場合にはデータ書込用 M T が必要であり, その論理機器番号は「 3 」である。

#### 4-2 計算例

付録1, 2, 3, 4に§4-1の入力形式によって行った計算結果の出力例を示す。付録2は、計算結果の平衡諸量を示し、付録3は、基準面上における外部磁場分布、プラズマ電流分布をプロッタ(COM)により描かせたものである。また、付録は、平衡プラズマの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。

#### 4-3 計算時間および精度

付録1の入力の場合(格子数 $39 \times 36$ ,  $\Delta r = 5\text{cm}$ ,  $\Delta\theta = 2^\circ$ , 最大 Legendre 陪函数次数 $= 40$ ), 使用記憶容量55KWであり, 収束判定条件 $\epsilon = 10^{-5}$ を満足するための逐次計算反復回数40回, CPU時間約2分である。ただし, プロッタ関係出力がある場合には使用記憶容量は110KW必要である。計算精度は, (3-15)で評価するとプラズマで領域での平均値として $\bar{\epsilon} \approx 7\%$ である。計算領域全体に渡つての平均誤差は $\langle \epsilon \rangle \approx 0.9\%$ である。

計算精度は, 最大 Legendre 陪函数次数(NUMAX)を大きくする程, また格子数(MR, NT)を多くする程よくなることが確かめられている。また, 計算に必要なCPU時間は, これら3量の積(MR $\times$ NT $\times$ NUMAX)にほぼ比例する。一方, 逐次計算反復回数は, 収束判定条件 $\epsilon = 10^{-5}$ の場合, これら3量とほとんど無関係に, 一様電流分布の時約10回, 放物形電流分布の時約40回である。

## 5. おわりに

本コードは, 任意のプラズマ断面形状を有するシュルレストカマ7プラズマの平衡配位計算に使用できる。特に, JT-4の様な磁気リミターがある場合有効であろう。本コードを用いて計算したJT-4プラズマの平衡配位の詳細については, 別の機会に報告する予定である。また, 本コードには, グラフィックディスプレイ上に於て会話形式で計算出来る様に改良されたコードも用意されている。

最後に, 吉川允二室長はじめ, JT-60開発室の諸氏に謝意を表わします。特に, 本コード作成初期のテストラン用計算例を提供して頂いた二宮博正, 亀有昭久両氏に深く感謝します。また, 両氏により作成された平衡計算コード「NIRVANA」および「EQUICO」を計算チェック用に使用させて頂いた。

本コード開発は, 日本原子力研究所東海研究所計算機センター・FACOM 230-75を用いて行われた。

#### 参考文献

- 1) W. Feneberg, K. Lackner: Nuclear Fusion 13 (1973) 549
- 2) クーラン, ヒルベルト: 「数理物理学の方法」 (東京図書) 第2巻, P 48

#### 4-2 計算例

付録1, 2, 3, 4に§4-1の入力形式によって行った計算結果の出力例を示す。付録2は、計算結果の平衡諸量を示し、付録3は、基準面上における外部磁場分布、プラズマ電流分布をプロッタ(COM)により描かせたものである。また、付録は、平衡プラズマの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。

#### 4-3 計算時間および精度

付録1の入力の場合(格子数 $39 \times 36$ ,  $\Delta r = 5\text{cm}$ ,  $\Delta \theta = 2^\circ$ , 最大 Legendre 陪函数次数 $= 40$ ), 使用記憶容量55KWであり, 収束判定条件 $\epsilon = 10^{-5}$ を満足するための逐次計算反復回数40回, CPU時間約2分である。ただし, プロッタ関係出力がある場合には使用記憶容量は110KW必要である。計算精度は, (3-15)で評価するとプラズマ領域での平均値として $\bar{\epsilon} \approx 7\%$ である。計算領域全体に渡つての平均誤差は $\langle \epsilon \rangle \approx 0.9\%$ である。

計算精度は, 最大 Legendre 陪函数次数(NUMAX)を大きくする程, また格子数(MR, NT)を多くする程よくなることが確かめられている。また, 計算に必要なCPU時間は, これら3量の積( $MR \times NT \times \text{NUMAX}$ )にほぼ比例する。一方, 逐次計算反復回数は, 収束判定条件 $\epsilon = 10^{-5}$ の場合, これら3量とほとんど無関係に, 一様電流分布の時約10回, 放物形電流分布の時約40回である。

### 5. おわりに

本コードは, 任意のプラズマ断面形状を有するシュルレストカマ7プラズマの平衡配位計算に使用できる。特に, JT-4の様な磁気リミターがある場合有効であろう。本コードを用いて計算したJT-4プラズマの平衡配位の詳細については, 別の機会に報告する予定である。また, 本コードには, グラフィックディスプレイ上に於て会話形式で計算出来る様に改良されたコードも用意されている。

最後に, 吉川允二室長はじめ, JT-60開発室の諸氏に謝意を表わします。特に, 本コード作成初期のテストラン用計算例を提供して頂いた二宮博正, 亀有昭久両氏に深く感謝します。また, 両氏により作成された平衡計算コード「NIRVANA」および「EQUICO」を計算チェック用に使用させて頂いた。

本コード開発は, 日本原子力研究所東海研究所計算機センター・FACOM 230-75を用いて行われた。

#### 参考文献

- 1) W. Feneberg, K. Lackner: Nuclear Fusion 13 (1973) 549
- 2) クーラン, ヒルベルト: 「数理物理学の方法」 (東京図書) 第2巻, P 48

#### 4-2 計算例

付録1, 2, 3, 4に§4-1の入力形式によって行った計算結果の出力例を示す。付録2は、計算結果の平衡諸量を示し、付録3は、基準面上における外部磁場分布、プラズマ電流分布をプロッタ(COM)により描かせたものである。また、付録は、平衡プラズマの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。

#### 4-3 計算時間および精度

付録1の入力の場合(格子数 $39 \times 36$ ,  $\Delta r = 5\text{cm}$ ,  $\Delta\theta = 2^\circ$ , 最大 Legendre 陪函数次数 = 40), 使用記憶容量55KWであり, 収束判定条件 $\epsilon = 10^{-5}$ を満足するための逐次計算反復回数40回, CPU時間約2分である。ただし, プロッタ関係出力がある場合には使用記憶容量は110KW必要である。計算精度は, (3-15)で評価するとプラズマ領域での平均値として $\bar{\epsilon} \approx 7\%$ である。計算領域全体に渡つての平均誤差は $\langle \epsilon \rangle \approx 0.9\%$ である。

計算精度は, 最大 Legendre 陪函数次数(NUMAX)を大きくする程, また格子数(MR, NT)を多くする程よくなることが確かめられている。また, 計算に必要なCPU時間は, これら3量の積( $MR \times NT \times \text{NUMAX}$ )にほぼ比例する。一方, 逐次計算反復回数は, 収束判定条件 $\epsilon = 10^{-5}$ の場合, これら3量とほとんど無関係に, 一様電流分布の時約10回, 放物形電流分布の時約40回である。

## 5. おわりに

本コードは, 任意のプラズマ断面形状を有するシュルレストカマ7プラズマの平衡配位計算に使用できる。特に, JT-4の様な磁気リミターがある場合有効であろう。本コードを用いて計算したJT-4プラズマの平衡配位の詳細については, 別の機会に報告する予定である。また, 本コードには, グラフィックディスプレイ上に於て会話形式で計算出来る様に改良されたコードも用意されている。

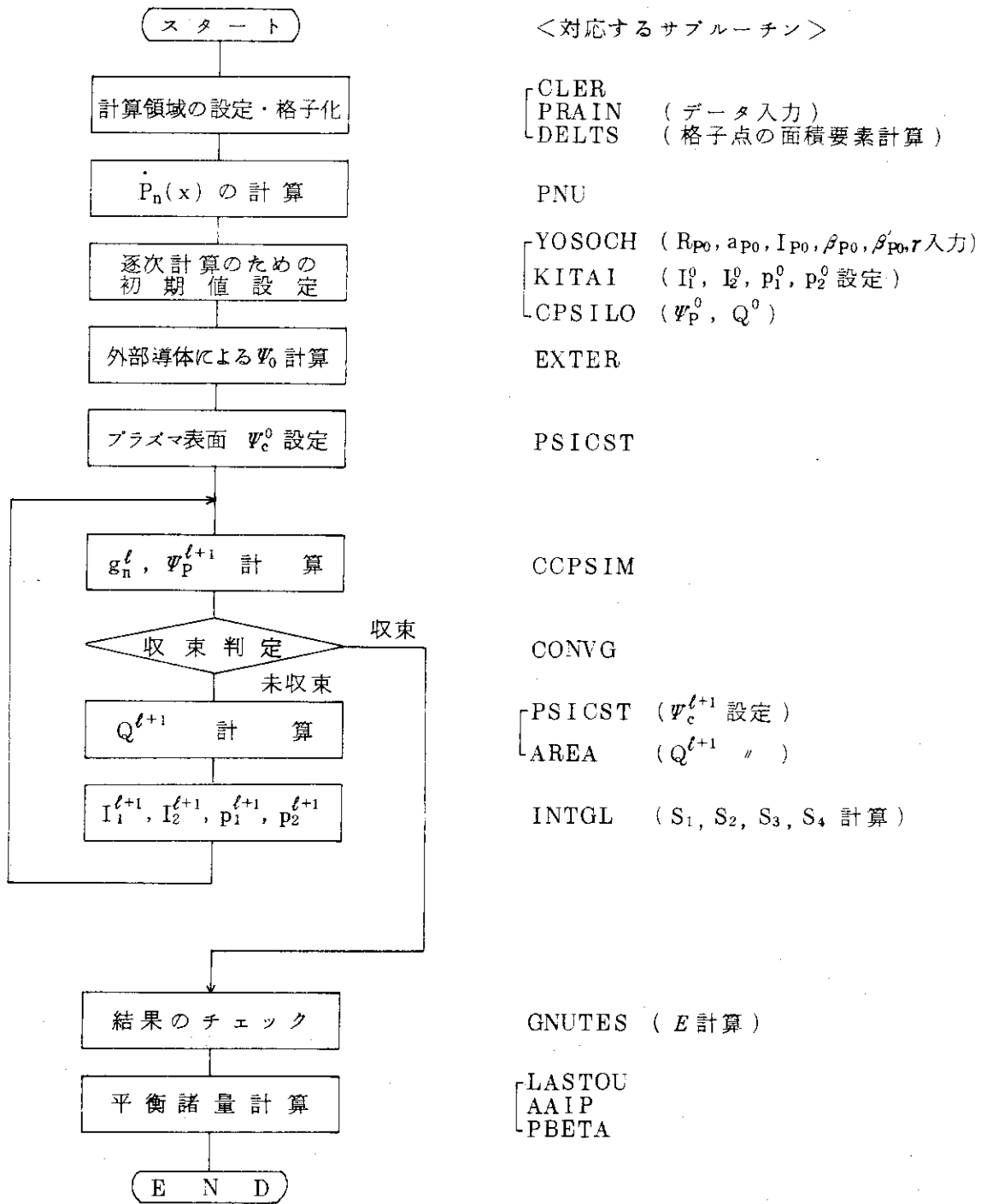
最後に, 吉川允二室長はじめ, JT-60開発室の諸氏に謝意を表わします。特に, 本コード作成初期のテストラン用計算例を提供して頂いた二宮博正, 亀有昭久両氏に深く感謝します。また, 両氏により作成された平衡計算コード「NIRVANA」および「EQUICO」を計算チェック用に使用させて頂いた。

本コード開発は, 日本原子力研究所東海研究所計算機センター・FACOM 230-75を用いて行われた。

#### 参考文献

- 1) W. Feneberg, K. Lackner: Nuclear Fusion 13 (1973) 549
- 2) クーラン, ヒルベルト: 「数理物理学の方法」 (東京図書) 第2巻, P 48





第6図 計算コードの概略的フローチャート

付録1 インプット例

```
*****
** USED MAX, SIZE **
MR, NT, JMAX =      40      40      30
USED DIMENSION A() SIZE = 15561      1976-08-16
*****
```

\*\*\*\*\* INPUT DATA LIST \*\*\*\*\*

IC NO.1  
\*\* EQUILIBRIUM CONFIGURATION BY LEGENDRE EXPANSION METHOD \*\*

IC NO.2  
ITAPE1 = 0 READ TAPE  
ITAPE2 = 0 EDIT TAPE  
ISTP = 0 RESTART KAISU  
LMAX = 60 MAX. ITERATION KAISU

IC NO.3  
RMIN = 0.600  
RMAX = 2.500  
THETA0 = 70.000  
EPS = 1.00000E-05

IC NO.4  
MR = 39  
NT = 36  
NUMAX = 40 NUMBER OF EXPANSION TERM  
IPRT = 0 EQ.1 PRINT OUT (EVERY ITER.)  
ITST = 0 G-NU EXAM. 0/1/2 NO/ EPS ONLY/ F AND EPS

IC NO.5  
IPLT = 2  
IPLT1 = 0  
IPLT2 = 0  
IPLT3 = 0  
IPLT4 = 2

IC NO.6  
LMTR = 2 1/2/3/4/5 FIXED POINT / JT-4 TYPE / PARALLEL RAIL LIMITER / JFT-2A TYPE / JT-60 TYPE  
RIC1 = 0.0  
ZIC2 = 0.0  
ZO = 0.0

IN THIS CASE  
JT-4 TYPE SEPARATRIX LIMITER \*\*\*

IC NO.7 EXPECTED PLASMA PARAMETERS

A RP AIP BETAP BETAPD GAMMA  
 4.00000E-01 1.45000E+00 1.00000E+06 1.00000E+00 1.00000E+00 1.00000E+00  
 WHERE

AIP=AIP/PAI/A\*\*2  
 AI1=RP\*(1.0-BETAP)\*AIP\*(1.0-GAMMA)  
 P1=BETAP/RP\*AIP\*(1.0-GAMMA)  
 AI2=(1.0-BETAPD)/MU0\*16.0/3.0/(A\*A)\*GAMMA  
 P2=BETAPD/MU0/(RP\*RP)\*16.0/3.0/(A\*A)\*GAMMA

AND

$$J = (P1 + P2*(PSI-PSIC))*R + (AI1 + AI2*(PSI-PSIC))/R$$

EXPECTED VALUES

I AVERAGE I1 I2 P1 P2  
 1.98944E+06 0.0 0.0 0.0 1.26163E+07

IC NO.8

ISHAP = 8  
 IVERT = 14  
 ICOIL = 22

IC NO.9

CORRECT = 0.950 VERTICAL FIELD CORRECTION FACTOR

IC NO.10

EXTERNAL FIELD COIL

ISHAP, IVERT = 8 14

I	AI	ZI	J1
1	1.30000E+00	8.00000E-01	1.00000E+05
2	1.30000E+00	-8.00000E-01	1.00000E+05
3	1.30000E+00	9.00000E-01	1.00000E+05
4	1.30000E+00	-9.00000E-01	1.00000E+05
5	1.10000E+00	6.00000E-01	-1.00000E+05
6	1.10000E+00	-6.00000E-01	-1.00000E+05
7	1.55000E+00	6.50000E-01	-1.00000E+05
8	1.55000E+00	-6.50000E-01	-1.00000E+05
9	7.30000E-01	1.00000E-01	-4.75886E+04
10	7.30000E-01	-1.00000E-01	-4.75886E+04
11	7.30000E-01	3.20000E-01	-9.51772E+04
12	7.30000E-01	-3.20000E-01	-9.51772E+04
13	9.50000E-01	1.62000E+00	2.37943E+05
14	9.50000E-01	-1.62000E+00	2.37943E+05
15	1.30000E+00	1.60000E+00	1.42766E+05
16	1.30000E+00	-1.60000E+00	1.42766E+05
17	1.60000E+00	1.55000E+00	1.42766E+05
18	1.60000E+00	-1.55000E+00	1.42766E+05
19	2.15000E+00	6.50000E-01	-9.51772E+04
20	2.15000E+00	-6.50000E-01	-9.51772E+04
21	2.20000E+00	3.20000E-01	-2.85531E+05
22	2.20000E+00	-3.20000E-01	-2.85531E+05

## 付録2 計算結果の平衡諸量

```

*** PLASMA SURFACE ***  LMTR = 2
      IC1 = 10  IC2 = 1  IC3 = 24  PSI(SURFACE) = 1.61637E-01

```

## \*\*\* EQUILIBRIUM QUANTITIES \*\*\*

```

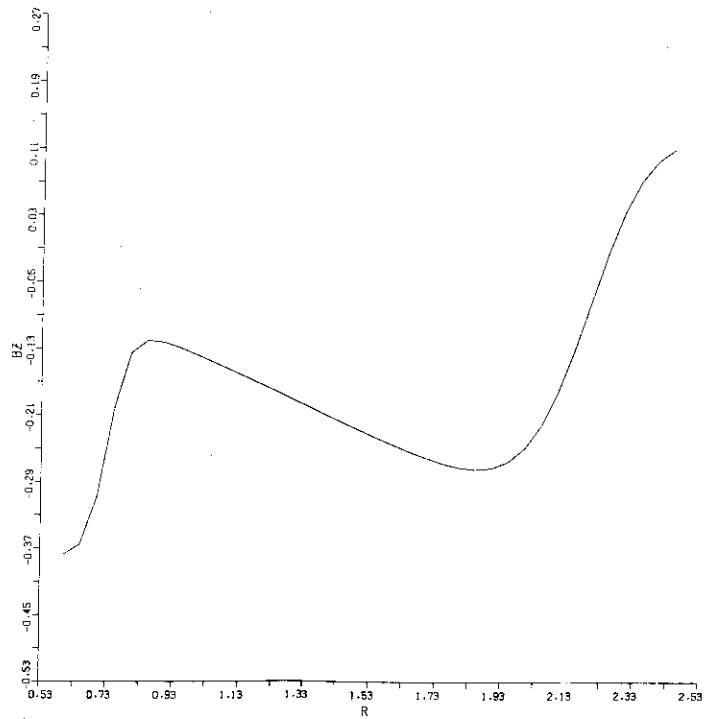
I1 = 0.0      I2 = 0.0
P1 = 0.0      P2 = 0.11906E+08
PSI CONST. = 0.15528E+00

```

MAJOR RADIUS	1.40000 (M)
MINOR RADIUS(AVE)	0.45552 (M)
R-SEMI AXIS	0.35000 (M)
Z-SEMI AXIS	0.59286 (M)
ASPEXT RATIO	3.07340
ELLIPTICITY	1.69388
MAGNETIC AXIS	1.45000 (M)
PLASMA CURRENT	999.99992 (KA)
CROSS SECTION	0.65188 (M**2)
VOLUME	5.75504 (M**3)
BETAP	0.86190
BETAP(AVE)	0.42908

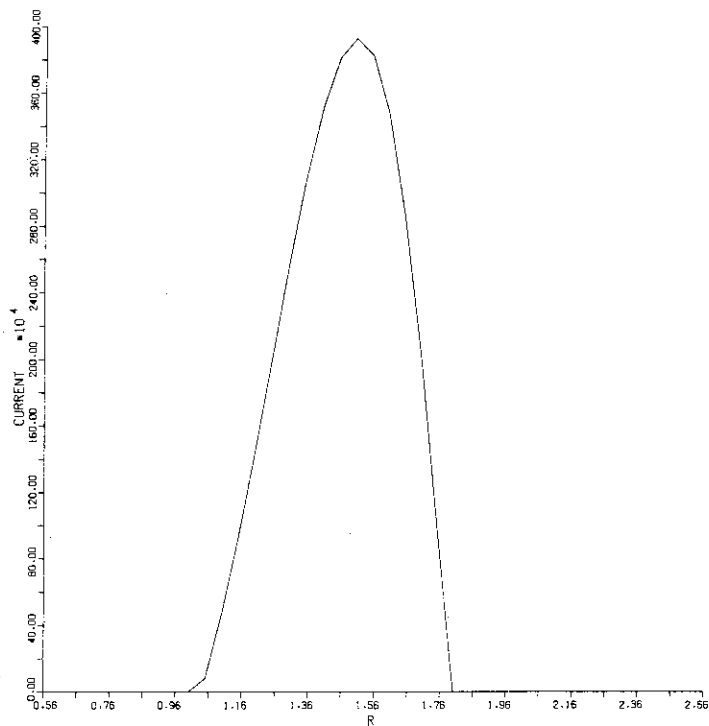
付録 3-1 R 軸上における外部垂直磁場分布

BZ DIST. BY IVERT,ISHAP

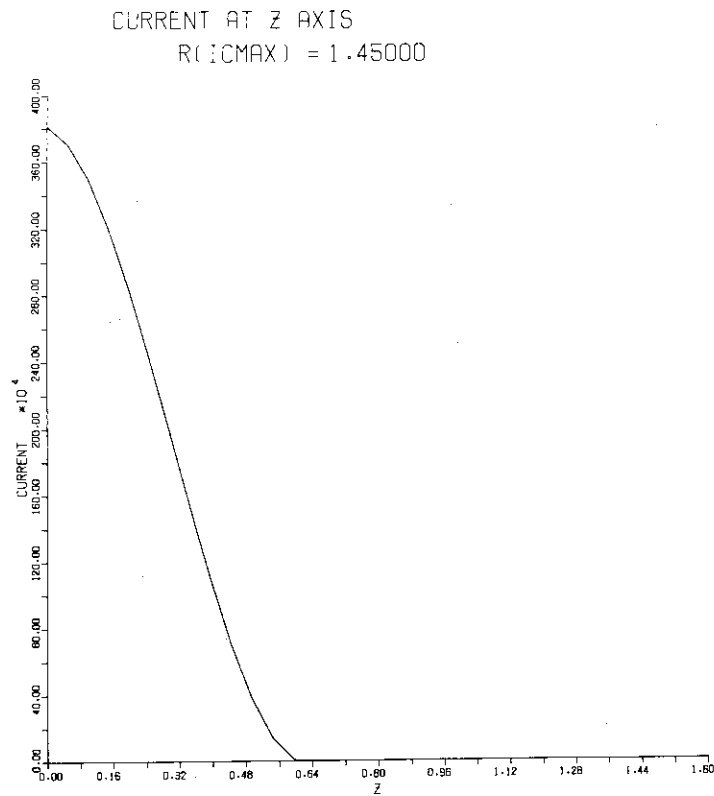


付録 3-2 R 軸上におけるプラズマ電流密度分布

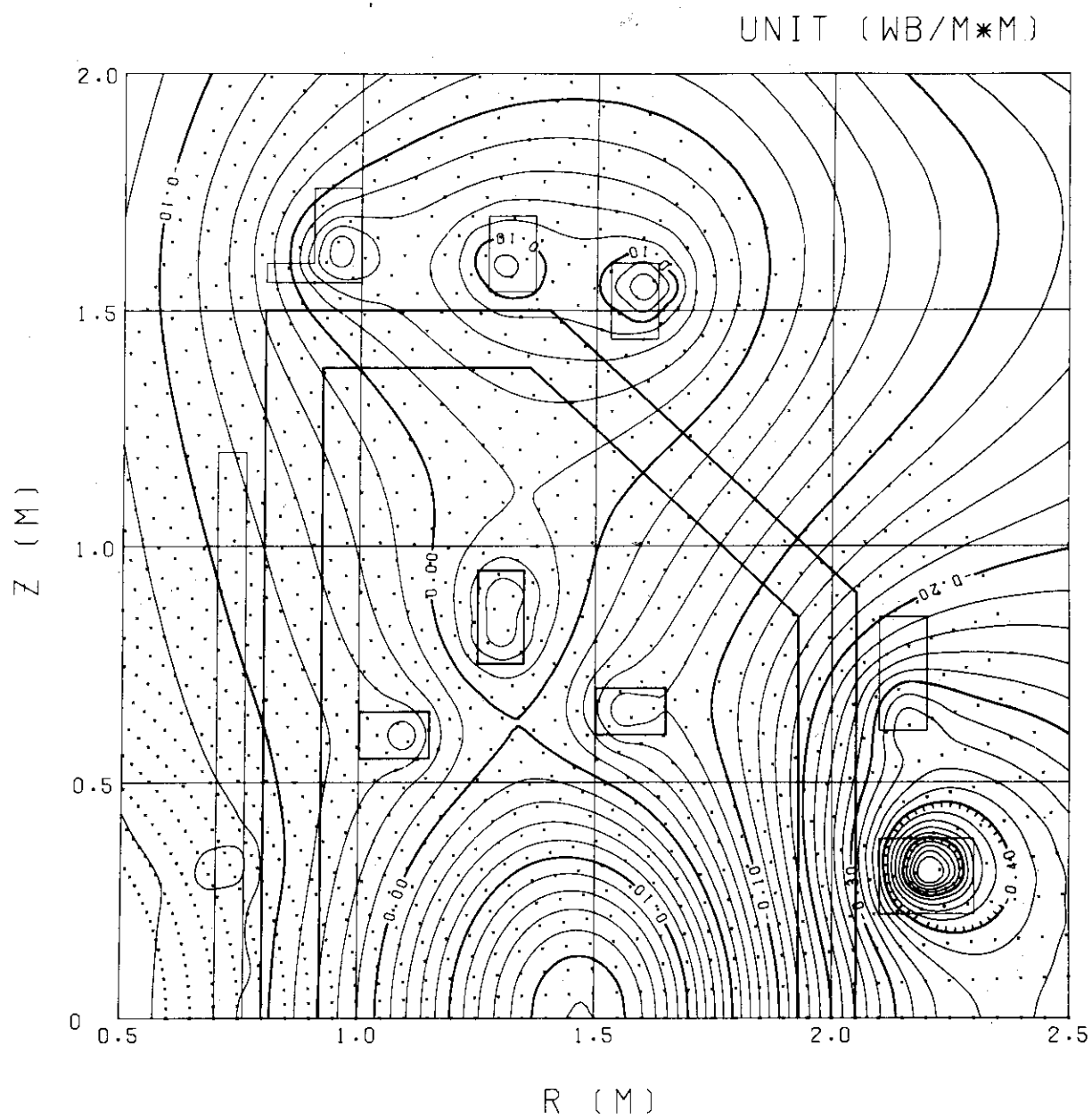
CURRENT AT R AXIS



付録 3-3 磁気軸と stagnation point を結ぶ線上におけるプラズマ電流密度分布



付録4 平衡プラズマの等磁束面 (JT-4の例)







```

C *** MAIN FLOW ***
C
1 SUBROUTINE MAIN (R,DELTS1,DELTS2,SS,PSIO,PSIL,PSIM,WK,PSIOS,PSIOV,
* FUNC,@,GNU,PPNU,BZ,AN)
C
2 COMMON / INPT / RZERO,THETA0,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTR,IC1,IC2,
* CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
3 COMMON / FIXD / PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK
4 COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,S1,S2,S3,S4,ISTEP
5 COMMON / RSTT / ITAPE1, ITAPE2, ITR, ITW
6 COMMON / UNTP / ITPLT
7 COMMON / JACK / JMA
8 COMMON / JKL / AIP
C
9 DIMENSION TITL(18),R(MR),DELTS1(MR),DELTS2(MR),SS(MR),PSIO(MR,NT),
* PSIL(MR,NT),PSIM(MR,NT),WK(MR,NT),PSIOS(MR,NT),PSIOV(MR,NT),
* FUNC(MR,NT),@(MR,NT),GNU(JMA,MR),PPNU(JMA,NT),BZ(MR,3),
* AN(MR,2),ITER(100)
10 DOUBLE PRECISION X(100)
11 DATA PAI/ 3.14159/
C
12 ISTOP=0
13 800 CONTINUE
14 AMU0= 4.0*PAI*1.0E-7
15 ISTEP = 0
16 ITR = 1
17 ITW = 2
18 ITPLT = 3
C
C PREPARATION
C
19 CALL CLEAR(PSIO,PSIL,PSIM,@,DELTS1,DELTS2,WK,PSIOS,PSIOV,BZ,AN)
20 CALL PRAIN(R,X,TITL,18,PSIL,PSIO,@,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN)
21 THEMAX=THETA0
22 THETA0=PAI/2,0-THETA0*PAI/180,0
23 IF ( ITAPE1 ,EQ, 1 ) GO TO 1
24 IF (JMAX,GT,JMA) GO TO 950
25 CALL DELTS(DELTS1,DELTS2,MR,NT,R0,THETA0,R,PAI)
26 CALL PNU(PPNU,X,NT,NUMAX,JMAX)
27 CALL YOSUCH
28 CALL KITA(PAI,PSIC,A11,A12,P1,P2)
29 CALL CPSILO(PSIL,MR,NT,R,X,AMU0,PAI,@)
30 CALL EXTER ( PSIO,R,X,PAI,AMU0,PSIOS,PSIOV,BZ,AN )
31 CALL PSICST(LMTR,IC1,IC2,CO,PSIC,PSIL,PSIO,MR,NT,R,X,RZERO,
1 THETA0,WK)
32 IF ( ITAPE2 ,EQ, 1 )
* CALL RSTW (PSIL,PSIO,@,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN)
33 WRITE(6,1000)
34 WRITE(6,260) (I,R(I),I=1,MR)
35 DLHTA=THEMAX/FLOAT(NT-1)
36 DO 1100 I=1,NT
37 DAM=DLHTA*FLOAT(I-1)
38 1100 WRITE(6,261) I,DAM,X(I)
39 WRITE(6,1200)
40 CALL MATPR(PSIL,MR,NT)
41 WRITE(6,1050)
42 CALL MATPR(PSIO,MR,NT)
43 WRITE(6,1250)
C
C START ITERATIONS
C
44 1 CONTINUE
45 ISTEP = ISTEP + 1
46 CALL CCPSIM(PSIM,PSIL,PSIO,PPNU,GNU,X,R,@,WK,PAI,AMU0,FUNC,SS)
C TEST CONVERGENCE
47 CALL CONVG(PSIM,PSIL,ITER,EPS,KOV,ERRMAX,MR,NT,100)
48 WRITE(6,200) ISTEP,KOV,ERRMAX
49 WRITE(6,400) PSIC,IC1,IC2
50 IF(KOV ,EQ, 0 ) GO TO 80
51 IF(ISTEP,GT, LMAX) GO TO 85
52 DO 15 J=1,NT
53 DO 15 I=1,MR
54 PSIL(I,J) = PSIM(I,J)
55 15 CONTINUE
56 CALL PSICST(LMTR,IC1,IC2,CO,PSIC,PSIL,PSIO,MR,NT,R,X,RZERO,
1 THETA0,WK)
57 CALL AREA ( @,PSIL,PSIO, R,X)
58 CALL INTGL(S1,S2,S3,S4,DELTS1,DELTS2,@,R,X,MR,NT,PSIL,PSIO,
1 PSIC)
59 PLCRT=A11*S1+A12*S2+P1*S3+P2*S4
60 PLCRT=2,0*PLCRT
61 AKEISU=AIP/PLCRT
62 A11=AKEISU*A11
63 A12=AKEISU*A12
64 P1 =AKEISU* P1
65 P2 =AKEISU* P2
66 IF (IPRT ,EQ, 1 ) CALL OUTP(PSIL,MR,NT,ISTEP)
67 IF(ITAPE2 ,EQ, 1)
* CALL RSTW(PSIL,PSIO,@,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN)
68 WRITE(6,300) PLCRT,AKEISU,A11,A12,P1,P2
69 GO TO 1
70 85 WRITE(6,100)

```

```

C
C      END OF ITERATION
C
71 80 CONTINUE
72   IF ( ITAPE2 ,EQ, 1 )
73   * CALL RSTW(PSIM,PSIO,Q,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN)
74   CALL GNUTS(MR,NT,JMAX,PPNU,GNU,WK,FUNC,Q,X)
75   CALL LASTOU (PSIM,PSIO,FUNC,WK,MR,NT,PSIC,AMUO,
76   1 R,X,Q,1,DELTS1,DELTS2,PSIL,PSIOV,PSIOS,BZ)
77   IF (ISTOP,EQ,1) GO TO 900
78   GO TO 800
79   900 RETURN
80   950 WRITE(6,960) JMAX,JMA
81   STOP 999
C
80 100 FORMAT(///5X,10('NG'),' NOT CONVERGE ',25('NG')///)
81 200 FORMAT(1H0.5X,'ITER,TIME =',15.5X,'NOT CONVERGED MESH =',15.5X,
82   * 'MAX,ERROR =',1PE13.6)
83 260 FORMAT(4X,'I',15.7X,'R(I) =',1PE13.5)
84 261 FORMAT(5X,15.7X,'T(I) (DEG.) =',F8.2,7X,'X(I) = SIN(T(I)) =',1PE10.3)
85 300 FORMAT(10X,'PLASMA CURRENT =',1PE12.5,5X,'KEISU =',E12.5/15X,
86   * 'A11 =',1PE12.5,5X,'A12 =',E12.5,5X,'P1 =',E12.5,5X,'P2 =',
87   * 'E12.5)
88 400 FORMAT(10X,'PSI(SURFACE) =',1PE12.5,' (WB)',5X,'(IC1,IC2) = (',
89   * '215,')')
90 960 FORMAT(///5X,'*** DIMENSION OVER FOR PNU ***      JMAX =',15,
91   * '      JMA =',15//)
87 1000 FORMAT(1H1//30X,'***** MESH POINTS AND INITIAL VALUES *****//')
88 1050 FORMAT(///' *** INITIAL EXTERNAL PSI  PSIO ****//')
89 1200 FORMAT(///' *** INITIAL PLASMA PSI  PSIL ****//')
90 1250 FORMAT(1H1//)
91   END

```

```

C *** CLEAR ***
C      THIS ROUTINE  CLEARS THE WORK AREA
C
1  SUBROUTINE CLEAR(PSIO,PSIL,PSIM,Q,DELTS1,DELTS2,WK,
2  * PSIOS,PSIOV,BZ,AN)
C
3  COMMON / INPT / RZERO,THETAQ,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTR,IC1,IC2,
4  * CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
5  DIMENSION PSIO(MR,NT), PSIL(MR,NT), PSIM(MR,NT), Q(MR,NT),
6  1 DELTS1(MR), DELTS2(MR), WK (MR,NT),
7  3 PSIOS(MR,NT), PSIOV(MR,NT), BZ(MR,3), AN(MR,2)
C
4  DO 10 J=1,NT
5  DO 10 I=1,MR
6  PSIO(I,J)=0.0
7  PSIL(I,J)=0.0
8  PSIM(I,J)=0.0
9  Q(I,J) =0.0
10 WK(I,J) =0.0
11 PSIOS(I,J) = 0.0
12 PSIOV(I,J) = 0.0
13 10 CONTINUE
14 DO 20 I=1,MR
15 DELTS1(I)=0.0
16 DELTS2(I)=0.0
17 20 CONTINUE
18 DO 40 J=1,3
19 DO 40 I=1,MR
20 BZ(I,J) = 0.0
21 40 CONTINUE
22 DO 50 J=1,2
23 DO 50 I=1,MR
24 AN(I,J) = 0.0
25 50 CONTINUE
26 RETURN
27 END

```

```

C *** PRAIN***
C      PARAMETER INPUT
C
1      SUBROUTINE PRAIN (R,X,TITL,I18,PSIL,PSIO,@,DELTS1,DELTS2,
C      * PPNU,BZ,AN )
C
2      COMMON / INPT / RMAX,THETAO,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTTR,IC1,IC2,
C      * CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
3      COMMON / FIXD / PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK
4      COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,S1,S2,S3,S4,ISTEP
5      COMMON / RSTT / ITAPE1,ITAPE2,ITR,ITW
6      COMMON / RMIN / RMIN,DR,DHTA
7      COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
C
8      DIMENSION TITL(I18),R(100)
9      DOUBLE PRECISION X(100)
10     DATA INP,NT6,PAI / 5,6,3,14159/
C
11     ADR=PAI/180,
12     READ(5,100,END=99) (TITL(I),I=1,I18)
13     READ(5,350) ITAPE1,ITAPE2,ISTP,LMAX
14     IF (ITAPE1.EQ.0) GO TO 20
C
15     CALL RSTR(PSIL,PSIO,@,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN)
16     ISTEP = ISTP
17     CALL RSTR(PSIL,PSIO,@,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN)
18     RETURN
C
19     20 CONTINUE
20     READ(5,110) RMIN,RMAX,THETAO,EPS
21     RZERO=RMAX
22     READ(5,130) MR,NT,NUMAX,IPRT,ITST
23     READ(5,130) IPLT,(IPLT1(I),I=1,4)
24     READ (INP,120) LMTTR,RIC1,ZIC2,ZO
25     CO=ZO
26     JMAX=FLOAT(NUMAX+1)/2.0
C
27     COMPUTE MESH
28     DR=RZERO/RMIN
29     R(1)=RMIN
30     NT1 = NT - 1
31     DHTA = THETAO / FLOAT(NT1)
32     X(1) = 0.0
33     DO 1000 I=2,MR
34     1000 R(I)=RMIN+FLOAT(I-1)*DR
35     DO 1002 I=1,NT
36     I1 = I - 1
37     DAM = DHTA*FLOAT(I1)
38     X(I)=SIN(ADR*DAM)
39     1002 CONTINUE
40     DHTA=DHTA*ADR
C
C      PRINT OF INPUT DATA IN THIS ROUTINE
C
41     WRITE(NT6,200) TITL
42     WRITE(6,351) ITAPE1,ITAPE2,ISTP,LMAX
43     WRITE(6,210) RMIN,RMAX,THETAO,EPS
44     WRITE(6,211) MR,NT,NUMAX,IPRT,ITST
45     WRITE(NT6,340) IPLT,(IPLT1(I),I=1,4)
46     WRITE(6,341) LMTTR,RIC1,ZIC2,ZO
47     WRITE(NT6,310)
48     GO TO (11,12,13,14,15),LMTTR
49     11 CONTINUE
50     IC1 = IFIX ( ABS(RIC1-RMIN)/DR ) + 1
51     IC2 = IFIX ( ABS(ATAN(ZIC2/RIC1))/DHTA ) + 1
52     WRITE(6,330) IC1,IC2
53     RETURN
54     12 CONTINUE
55     WRITE(6,331)
56     RETURN
57     13 CONTINUE
58     WRITE(NT6,320)
59     RETURN
60     14 CONTINUE
61     WRITE(6,332)
62     RETURN
63     15 CONTINUE
64     WRITE(6,333)
65     RETURN
66     99 STOP 99
C
67     100 FORMAT(18A4)
68     110 FORMAT(8E10,5)
69     120 FORMAT(15,5X,3E10,5)
70     130 FORMAT(16I5)

```

TPA01020

IC NO.1  
IC NO.2

IC NO.3  
IC NO.4  
IC NO.5  
IC NO.6

```

71 200 FORMAT(////30X,'***** INPUT DATA LIST *****//5X,'IC NO,1'/
* 10X,18A4)
72 210 FORMAT(//5X,'IC NO,3'/
* 10X,'RMIN ='F10.3/10X,'RMAX ='F10.3/8X,'THETA0 ='F10.3/
* 11X,'EPS ='F10.3/10X,'EPS13,5'/)
73 211 FORMAT(//5X,'IC NO,4'/
* 12X,'MR ='F10.3/12X,'NT ='F10.3/9X,'NUMAX ='F10.3' NUMBER OF
*EXPANSION TERM//10X,'IPRT ='F10.3' EQ.1 PRINT OUT (EVERY ITER,)/
*10X,'ITST ='F10.3' G=NU EXAM, 0/1/2 NO/ EPS ONLY/ F AND EPS//)
74 240 FORMAT(1H0,11X,'A11 ='E13.5//12X,'A12 ='E13.5//13X,'P1 ='
1 E13.5//13X,'P2 ='E13.5)
75 270 FORMAT(4X,13,23X,1PE13,5)
76 310 FORMAT(1H0,10X,'IN THIS CASE')
77 320 FORMAT(10X,'PARALLEL PLATE LIMITER **** ')
78 330 FORMAT(10X,'FIXED POINT LIMITER **** C (C1,C2) = ('I3,' ',
* 'I3,' ')')
79 331 FORMAT(10X,'JT-4 TYPE SEPARATRIX LIMITER ****')
80 332 FORMAT(10X,'JFT-2A TYPE SEPARATRIX LIMITER ****')
81 333 FORMAT(10X,'JFT-60 TYPE SEPARATRIX LIMITER ****')
82 340 FORMAT(//5X,'IC NO,5'/
* 10X,'IPLT ='F10.3/9X,'IPLT1 ='F10.3/9X,'IPLT2 ='F10.3/
* 9X,'IPLT3 ='F10.3/9X,'IPLT4 ='F10.3/)
83 341 FORMAT(//5X,'IC NO,6'/
* 9X,'LMTTR ='F10.3' 1/2/3/4/5 FIXED POINT / JT-4 TYPE /
* PARALLEL RAIL LIMITER / JFT-2A TYPE / JT-60 TYPE//
* 10X,'RIC1 ='F10.3/10X,'ZIC2 ='F10.3/12X,'Z0
* ='F10.3/)
84 350 FORMAT(4I5)
85 351 FORMAT(//5X,'IC NO,2'/
* /8X,'ITAPE1 ='F10.3' READ TAPE//8X,'ITAPE2 ='F10.3' EDIT TA
*PE//10X,'ISTP ='F10.3' RESTART KAISU//10X,'LMAX ='F10.3' MAX. ITER
*ATION KAISU//)
86 END

```

```

C *** DELTS ***
C COMPUTE AREA (各メッシュの面積要素4Sを計算)
C
1 SUBROUTINE DELTS(DELTS1,DELTS2,MR,NT,RO,THETA0,R,PAI)
2 DIMENSION DELTS1(MR),DELTS2(MR),R(MR)
C
3 NT1 = NT - 1
4 DR2 = 0.5 * (R(2) - R(1))
5 DO 10 I=1,MR-1
6 DELTS1(I) = ((R(I)+DR2)**2 - (R(I)-DR2)**2) *
1 0.5 * (PAI*0.5 - THETA0) / FLOAT(NT1)
7 10 CONTINUE
8 DELTS2(MR) = 0.5*DELTS1(MR-1)
9 DO 20 I=1,MR
10 DELTS2(I) = 0.5*DELTS1(I)
11 20 CONTINUE
12 RETURN
13 END

```

```

C *** PNU ***
C CALCULATION OF 1ST ASSOCIATED LEGENDRE FUNCTION
C
1 SUBROUTINE PNU(PPNU,X,NT,NUMAX,JMAX)
2 DIMENSION PPNU(JMAX,NT)
3 DOUBLE PRECISION X(NT),P1NU,P2NU
C
4 DO 1 I=1,NUMAX,2
5 I2=I+1
6 J=FLOAT(I+1)/2.0
7 DO 1 K=1,NT
8 CALL LEGDD(X(K),I,P1NU,ILL)
9 CALL LEGDD(X(K),I2,P2NU,ILL)
10 IF(ILL.NE.0) GO TO 80
11 PPNU(J,K)=I2/(X(K)*X(K)-1.0)*(P2NU-X(K)*P1NU)
12 1 CONTINUE
13 GO TO 300
14 80 WRITE(6,100) ILL
15 100 FORMAT(' LEGENDRE FUNCTION IRREGULAR ',I10)
16 300 RETURN
17 END

```

```

C *** YOSUCH ***
C INPUT OF EXPECTED PLASMA PARAMETERS
C
1 SUBROUTINE YOSUCH
2 COMMON/CM1/A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
3 COMMON / JKL / PLAS
C
4 READ(5,10) A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
5 WRITE(6,20) A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
6 PLAS=AIP
7 WRITE(6,21)
8
9 10 FORMAT(6E10,5)
20 FORMAT(/,5X,'IC NO.7 EXPECTED PLASMA PARAMETERS'/
* 14X,'A',12X,'RP',11X,'AIP',10X,'BETAP',7X,'BETAPD',
* 7X,'GAMMA',/,11X,1P6E13,5)
10 21 FORMAT(14X,'WHERE'/20X,'AIP=AIP/PAI/A**2'/20X,'A11=RP*(1,0-BETAP)*
*AIP*(1,0-GAMMA)',/20X,'P1=BETAP/RP*AIP*(1,0-GAMMA)'/20X,'A12=(1,0-
*BETAPD)/MUO*16,0/3,0/(A*A)*GAMMA'/20X,'P2=BETAPD/MUO/(RP*RP)*16,0/
*3,0/(A*A)*GAMMA' /14X,'AND'/20X,'J = (P1 + P2*(
*PSI-PSIC))*R +(A11 + A12*(PSI-PSIC))/R')
11 RETURN
12 END

```

```

C *** KITAI ***
C CALCULATION OF I1,I2,P1,P2
C
1 SUBROUTINE KITAI(PAI,PSIC,A11,A12,P1,P2)
2 COMMON/CM1/A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
3 AIF=AIP/PAI/A**2
4 A11=RP*(1,0-BETAP)*AIF *(1,0-GAMMA)
5 P1= BETAP/RP*AIF *(1,0-GAMMA)
6 AMU=4,0E-7 * PAI
7 A12=(1,0-BETAPD)/AMU*16,0/3,0/(A*A)*GAMMA
8 P2=BETAPD/AMU/(RP*RP)*16,0/3,0/(A*A)*GAMMA
9 WRITE(6,10) AIF,A11,A12,P1,P2
10 10 FORMAT(/,10X,'EXPECTED VALUES'/
* 13X,'AVERAGE',5X,'I1',11X,'I2',11X,'P1',11X,'P2',/,
* 11X,1P5E13,5)
11 RETURN
12 END

```

```

C *** CPSILO ***
C INITIAL FLUX FUNCTION OF PLASMA
C
1 SUBROUTINE CPSILO(PSIL,MR,NT,R,X,AMUO,PAI,Q)
C
2 COMMON/ CM1 /A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
3 DIMENSION PSIL(MR,NT),R(MR),Q(MR,NT)
4 DOUBLE PRECISION X(NT)
C
5 CONST=AMUO*AIP/PAI
6 DO I J=1,NT
7 DO I K=1,MR
8 RR=R(K)*DSQRT(1,-X(J)**2)
9 ZZ=R(K)*X(J)
10 GG=(RR-RP)**2+ZZ**2
11 Q(K,J)=0,
12 RHO=GG-A**2
13 IF(RHO,LE,0,.) Q(K,J)=1,
14 S=RR*RR+RP*RP+ZZ*ZZ
15 P=2,*RR*RP
16 RK=2,*P/(S+P)
17 RK=SQRT(RK)
18 IF(RK,GE,0,99999999) RK=0,99999999
19 CALL CEP12S(RK,1,ZK,ZE,ILL)
20 IF(ILL,NE,0) GO TO 10
21 PSIL(K,J)=CONST*SQRT(RR*RP)*((1,-RK*RK/2,)*ZK-ZE)/RK
22 1 CONTINUE
23 RETURN
C
24 10 WRITE(6,100) ILL
25 100 FORMAT(1H0,'*** ERROR OF ELLIPTIC FUNCTION AT SUB,CPSILO ***
* ILL = ',I5)
26 STOP 777
27 END

```

```

C *** EXTER ***
C EXTERNAL FIELD BY CONDUCTER PSIO
C CURRENT COIL (1) IS THE DIVERTOR COIL WHEN LMTR = 2,4,5
C
1 SUBROUTINE EXTER(PSIO,R,X,PAI,AMUO,PSIOS,PSIOV,BZ,AN)
C
2 COMMON / INPT / RZERO,THETAO,MR,NT,DUM1(9),IVERT,ISHAP,ICOIL
3 COMMON / FIXD / PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK
4 COMMON / RMIN / RMIN,DR,DTHTA
5 COMMON / CMI / A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
6 COMMON / CRNT / AI(200),ZI(200),JI(200)
C
7 DIMENSION PSIO(MR,NT) , PSIOS(MR,NT) , PSIOV(MR,NT) ,
* R(MR) , BZ (MR,3) , AN (MR,2)
8 DIMENSION DAI(100),DZI(100),DJI(100)
9 DOUBLE PRECISION X(NT)
10 REAL JI
C
11 READ(5,130) ISHAP,IVERT IC NO.8
12 ICOIL = ISHAP + IVERT
13 IF( ICOIL ,LE. 100) GO TO 30
14 WRITE(6,360) ISHAP,IVERT
15 STOP
16 30 CONTINUE IC NO.9
17 READ(5,1000) CORECT IC NO.10
18 READ(5,1000) (AI(I),ZI(I),JI(I),I=1,ICOIL)
19 DO 300 I=1,ICOIL
20 DAI(I)=AI(I)
21 DZI(I)=ZI(I)
22 DJI(I)=JI(I) *1,0E3
23 300 CONTINUE
24 DO 301 I=1,ICOIL
25 K2=2*I
26 K1=K2-1
27 AI(K1)=DAI(I)
28 AI(K2)=AI(K1)
29 ZI(K1)=DZI(I)
30 ZI(K2)=DZI(I)
31 JI(K1)=DJI(I)
32 JI(K2)=DJI(I)
33 301 CONTINUE
34 ICOIL=2*ICOIL
35 IVERT=2*IVERT
36 ISHAP=2*ISHAP
C
C EXTERNAL FIELD BY ISHAPS CONDUCTER
C
37 IF ( ISHAP ,EQ. 0 ) GO TO 15
38 DO 12 J=1,NT
39 DO 11 K=1,MR
40 IF(J,EQ.1) BZ(K,1)=0,
41 RR = R(K)*DSQRT(1. - X(J)*X(J))
42 ZZ=R(K)*X(J)
43 DO 10 I=1,ISHAP
44 S=RR*RR+AI(I)**2+(ZZ-ZI(I))**2
45 P=2,0*RR*AI(I)
46 SQSP=SQRT(S+P)
47 AKI2=2,0*P/(S+P)
48 AKI1 = SQRT ( AKI2 )
49 CALL CELI1S ( AKI1,EK )
50 CALL CELI2S ( AKI1,EE )
51 PSIOS(K,J) = PSIOS(K,J) + 4,0E-7*JI(I)*0,5*SQSP
* ((1,0-0,5*AKI2)*EK - EE )
52 IF(J,NE,1) GO TO 10
53 BZ(K,1)=4,0E-7*JI(I)/(2,0*SQSP )*(EK-(S-2,*AI(I)**2)/(S-P)*EE)
**BZ(K,1)
54 10 CONTINUE
55 11 CONTINUE
56 12 CONTINUE
57 15 CONTINUE
C
C EXTERNAL FIELD BY IVERTS CONDUCTER
C
58 IF ( ISHAP ,EQ. ICOIL ) GO TO 25
59 DO 22 J=1,NT
60 DO 21 K=1,MR
61 IF(J,EQ.1) BZ(K,2)=0,
62 RR = R(K)*DSQRT(1. - X(J)*X(J))
63 ZZ=R(K)*X(J)
64 DO 20 I=ISHAP+1,ICOIL
65 S=RR*RR+AI(I)**2+(ZZ-ZI(I))**2
66 P=2,0*RR*AI(I)
67 SQSP=SQRT(S+P)
68 AKI2=2,0*P/(S+P)
69 AKI1 = SQRT ( AKI2 )
70 CALL CELI1S ( AKI1,EK )
71 CALL CELI2S ( AKI1,EE )
72 PSIOV(K,J) = PSIOV(K,J) + 4,0E-7*JI(I)*0,5*SQSP
* ((1,0-0,5*AKI2)*EK - EE )

```

```

73     IF(J,NE,1) GO TO 20
74     BZ(K,2)=4.0E-7*JI(1)/(2.0*SWSP      )*(EK-(S-2,*A1(1)**2)/(S-P)*EE)
      **BZ(K,2)
75     20 CONTINUE
76     21 CONTINUE
77     22 CONTINUE
78     25 CONTINUE
      C
      C     SEARCH BYSHAP , BVRP
      C
79     AMX = RZERO
80     DO 40 I=1,MR
81     B = ABS ( R(I) - RP )
82     IF ( AMX ,LE, B ) GO TO 40
83     AMX = B
84     IMIN = I
85     40 CONTINUE
86     BVSHAP = BZ(IMIN,1)
87     BVRP   = BZ(IMIN,2)
      C
      C     AN
      C
88     DO 50 J=2,MR-1
89     I = J - 1
90     K = J + 1
91     IF ( ISHAP ,EQ, 0 ) GO TO 52
92     AN(J,1)=R(J)*(BZ(I,1)-BZ(K,1))/BZ(J,1)/DR/2.0
93     52 CONTINUE
94     IF ( ISHAP ,EQ, ICOIL ) GO TO 50
95     AN(J,2)=R(J)*(BZ(I,2)-BZ(K,2))/BZ(J,2)/DR/2.0
96     50 CONTINUE
      C
      C     CK
      C
97     CK=1.0
98     SEKI=0.25*(GAMMA+1.0)-1.5
99     IF(ISHAP,LT,ICOIL)
      *CK=(CORECT*(-(ALOG(8.*RP/A)+BETAP*SEKI)*AIP/RP*1,E-7) - BVSHAP) /
      * BVRP
      C
      C
100    DO 60 I=ISHAP+1,ICOIL
101    60 JI(I) = CK*JI(I)
102    DO 70 I=1,MR
103    BZ(I,2) = CK*BZ(I,2)
104    DO 70 J=1,NT
105    PSIOV(I,J) = CK*PSIOV(I,J)
106    PSIO(I,J) = PSIOS(I,J) + PSIOV(I,J)
107    70 CONTINUE
108    DO 35 I=1,MR
109    BZ(I,3) = BZ(I,1) + BZ(I,2)
110    35 CONTINUE
      C
      C     RESULTS PRINT
      C
111    WRITE(6,290) ISHAP,IVERT,ICOIL
112    WRITE(6,291) CORECT
113    WRITE(6,1010)ISHAP,IVERT
114    DO 100 I=1,ICOIL
115    WRITE(6,1020)I,A1(I),ZI(I),JI(I)
116    100 CONTINUE
117    WRITE(6,1030)
118    DO 110 I=1,MR
119    IF(I,EQ,1,OR,I,EQ,MR) ANINDX=0.
120    IF(I,NE,1,AND,I,NE,MR)
      *ANINDX=R(I)*(BZ(I-1,3)-BZ(I+1,3))/BZ(I,3)/DR/2.0
121    WRITE(6,1040)I,R(I),BZ(I,1),BZ(I,2),AN(I,1),AN(I,2),BZ(I,3),ANINDX
122    110 CONTINUE
123    RETURN
      C
124    130 FORMAT(5I5)
125    1000 FORMAT(3F10.0)
126    290 FORMAT(/5X,'IC NO,8'/10X,'ISHAP =',15/10X,'IVERT =',15/
      * 10X,'ICOIL =',15)
127    291 FORMAT(/5X,'IC NO,9'/
      * 8X,'CORECT =',F10.3,' VERTICAL FIELD CORRECTION FACTOR')
128    360 FORMAT(' ',ISHP,15,' IVERT',15,' ICOIL ,GT, 100')
129    1010 FORMAT(/5X,'IC NO,10'/
      * 10X,'EXTERNAL FIELD COIL      [ISHAP, IVERT =',2I9/
      * 12X,'I',5X,'A1',11X,'ZI',11X,'JI')
130    1020 FORMAT(' ',10X,13,2X,1P3E13,5)
131    1030 FORMAT(///10X,'BZ -- VERTICAL FIELD BY EXTERNAL COILS / AN
      *-- N-INDEX'/20X,'S -- SHAPING COIL / V -- VERTICAL COIL /
      *T -- TOTAL COIL'///
      * 12X,'R MESH NO, R',12X,'BZ S',9X,'BZ V',9X,'AN S',9X,
      * 'AN V',15X,'BZ T',10X,'AN T')
132    1040 FORMAT(' ',14X,13,5X,F7,3,5X,1P4E13,5,5X,2(E13,5,2X))
133    END

```

```

C *** CCPSIM ***
C COMPUTE PSIM MAGNETIC FIELD BY IMAGE AND
C PLASMA CURRENT
C FFF WORK AREA FOR INTEGRATION
C
1 SUBROUTINE CCPSIM(PSIM,PSIL,PSIO,PPNU,GNU,X,R,Q,FGNU,PAI,EMUO,
1 FUNC,SS)
C
2 COMMON / INPT / RZERO,THETA0,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTTR,IC1,IC2,
* CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
3 COMMON / FIXD / PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK
4 COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,S1,S2,S3,S4,ISTEP
5 COMMON /HMIN / RMIN,DR,DTHTA
C
6 DIMENSION PSIM(MR,NT),PSIL(MR,NT),PSIO(MR,NT),R(MR),Q(MR,NT),
1 PPNU(JMAX,NT),GNU(JMAX,MR),FFF(100),FUNC(MR,NT),
2 FGNU(MR,NT),SS(MR)
7 DOUBLE PRECISION X(NT)
8 DATA N6 / 6 /
C
C FIELD CLEAR
9 DO 30 J=1,NT
10 DO 30 I=1,MR
11 PSIM(I,J) = 0.0
12 30 FGNU(I,J) = 0.0
13 DO 3 L=1,JMAX
14 DO 3 J=1,MR
15 DO 4 K=1,NT
16 FUNC(J,K)=-EMUO*(A11+A12*(PSIL(J,K)+PSIO(J,K)-PSIC))
1 -EMUO*(J)**2*(1.0-X(K))*X(K))*(P1+P2*(PSIL(J,K)+PSIO(J,K)
2 -PSIC))
17 4 FFF(K)=Q(J,K)*FUNC(J,K) *PPNU(L,K)*DSQRT(1.0-X(K)**2)
18 SS1=SEKBN(FFF,DTHTA,NT,ISBN)
19 IF(ISBN.NE.0) GO TO 85
20 GNU(L,J)=(4.0*FLOAT(L)-1.0)/(2.0*FLOAT(L)-1.0)/2.0/FLOAT(L)* SS1
21 3 CONTINUE
22 DO 16 L=1,JMAX
23 DO 11 J=1,MR-1
24 DO 12 K=J,MR
25 I1=K-J+1
26 FFF(I1)=GNU(L,K)/R(K)**(2*L-1)
27 12 CONTINUE
28 I1=MR-J+1
29 SS1=TANZA(FFF,DR,I1,ISBN)
30 SS1= R(J)**(2*L)*SS1
31 SS1=-SS1/FLOAT(4*L-1)
32 11 SS(J) = SS1
33 SS(MR) = 0.0
34 DO 13 J=1,MR
35 DO 14 K=1,J
36 14 FFF(K)=GNU(L,K)*R(K)**(2*L)
37 I12=J
38 SS2=TANZA(FFF,DR,I12,ISBN)
39 SS2=SS2/R(J)**(2*L-1)
40 13 SS(J)=-SS2/FLOAT(4*L-1)+SS(J)
41 DO 16 KK=1,NT
42 DO 16 J=1,MR
43 16 PSIM(J,KK)=SS(J)*(1.0-X(KK))*X(KK))*PPNU(L,KK)+PSIM(J,KK)
C TEST GNU=F
44 IF(ITST.NE.0) GO TO 100
45 GO TO 99
46 85 WRITE(N6,110)
47 110 FORMAT(' INTEGRATION IS NOT EXECUTED')
48 GO TO 99
49 100 CONTINUE
50 DO 70 J=1,NT
51 DO 70 I=1,MR
52 DO 70 L=1,JMAX
53 70 FGNU(I,J)=FGNU(I,J)+GNU(L,I)*(1.0-X(J)**2)*PPNU(L,J)
54 DO 71 I=1,MR
55 DO 71 J=1,NT
56 71 FUNC(I,J)=FUNC(I,J)+Q(I,J)
57 IF(ITST.EQ.1) GO TO 200
58 WRITE(N6,120)
59 120 FORMAT(IH1,/,10X,'FGNU(MR,NT)')
60 CALL MATPR(FGNU,MR,NT)
61 WRITE(N6,130)
62 130 FORMAT(IH1,/,10X,'FUNC(MR,NT)')
63 CALL MATPR(FUNC,MR,NT)
64 200 CONTINUE
65 DO 72 I=1,MR
66 DO 72 J=1,NT

```



```

67     IF(FUNC(I,J).NE.0) GO TO 73
68     FGNU(I,J)=ABS(FGNUM(I,J))
69     GO TO 72
70     73 AA=ABS(FUNC(I,J)-FGNU(I,J))
71     FGNU(I,J)=AA/ABS(FUNC(I,J))
72     72 CONTINUE
73     WRITE(N6,140)
74     140 FORMAT(1H1,/,10X,'SOTAI GOSA (MR,NT) ')
75     CALL MATPR(FGNUM,MR,NT)
76     99 RETURN
77     END

```

```

C *** CONVG ***
C     TEST PSI CONVERGENCE
C
1     SUBROUTINE CONVG(PSIM,PSIL,ITER,EPS,KOV,ERRMAX,MR,NT,III)
C
2     DIMENSION PSIM(MR,NT),PSIL(MR,NT),ITER(III)
3     ERRMAX=EPS
4     DO 10 J=1,NT
5     ITER(J) = 0
6     DO 10 I=1,MR-1
7     S=(PSIM(I,J) - PSIL(I,J)) / PSIM(I,J)
8     S = ABS(S)
9     IF ( S - EPS ) 2,3,3
10    2 ITER2 = 0
11    GO TO 4
12    3 ITER2 = 1
13    IF(S.GT.ERRMAX) ERRMAX=S
14    4 ITER(J) = ITER(J) + ITER2
15    10 CONTINUE
16    ITER1 = 0
17    DO 20 J=1,NT
18    20 ITER1 = ITER(J) + ITER1
19    IF(ITER1.NE. 0) GO TO 70
20    KOV = 0
21    WRITE(6,100)
22    100 FORMAT(/,5X,20('**'),' CONVERGE ',50('**')//)
23    GO TO 80
24    70 KOV = ITER1
25    80 RETURN
26    END

```

```

C *** PSICST ***
C     IF LMTR .EQ. 1      PSIC = PSIJ(IC1,IC2) + PSIO(IC1,IC2)
C     .NE. 1             SEARCH LIMIT VALUE
C                       EQ. 2      JT-4 TYPE MAGNETIC LIMITER
C                       EQ. 3      PARALLEL RAIL LIMITER
C                       EQ. 4      JFT-2A TYPE MAGNETIC LIMITER
C                       EQ. 5      JT-60 TYPE MAGNETIC LIMITER
C     CURRENT COIL (1) IS THE DIVERTOR COIL
C
1     SUBROUTINE PSICST(LMTR,IC1,IC2,CO,PSIC,PSIL,PSIO,MR,NT,
2     1 R,X,RZERO,THETA,WK)
C
3     COMMON /RMIN / RMIN,DR,DHTA
4     COMMON / CM1 / A,RP,DM1(4)
5     COMMON / CRNT / AI(200),ZI(200),JI(200)
6     COMMON / NTMAX / NTM
C
7     DIMENSION PSIL(MR,NT),PSIO(MR,NT),R(MR),WK(NT)
8     DOUBLE PRECISION X(NT)
C
9     NTM=NT
10    GO TO (51,52,53,54,55),LMTR
C ** FIXED POINT LIMITER
11    51 CONTINUE
12    PSIC = PSIL(IC1,IC2) + PSIO(IC1,IC2)
13    RETURN
C ** JT-4 TYPE MAGNETIC LIMITER
14    52 CONTINUE
15    MIN=(RP-A-RMIN)/DR+1
16    MAX=(RP+A-RMIN)/DR+1
17    ATAI=0.0

```

```

17      DO 4 I=MIN,MAX
18      ASA=PSIL(1,1)+PSIO(1,1)
19      IF(ASA.LT.ATAI) GO TO 4
20      ATAI=ASA
21      MMM=I
22      4 CONTINUE
23      IF(ATAI.LE.0.U.OR.MMM.EQ.MIN.OR.MMM.EQ.MAX)
          * WRITE(6,100) ATAI,MMM
24      TE=ATAN(ZI(1)/AI(1))
25      RAX=R(MMM)
26      NMAX=TE/DTHTA+1
27      DO 5 I=2,NMAX
28      XX=X(I)
29      RAD=RAX/(SQRT(1.-XX*XX)-(AI(1)-RAX)*XX/ZI(1))
30      MUTU=(RAD-RMIN)/DR+1
31      WK(1)=((PSIL(MUTU+1,1)+PSIO(MUTU+1,1))*(RAD-R(MUTU)) +
          * (PSIL(MUTU,1)+PSIO(MUTU,1))*(R(MUTU+1)-RAD))/DR
32      5 CONTINUE
33      ATAI=PSIL(MMM,1)+PSIO(MMM,1)
34      DO 6 I=2,NMAX
35      IF(WK(I).GT.ATAI) GO TO 6
36      ATAI=WK(I)
37      NTM=I
38      6 CONTINUE
39      IF(NTM.EQ.1.OR.NTM.EQ.NMAX) WRITE(6,200) ATAI,NTM,MMM
40      PSIC=ATAI
41      DO 30 I=1,MR
42      PSIT=PSIL(1,1)+PSIO(1,1)
43      IF(PSIT.GE.PSIC) GO TO 35
44      30 CONTINUE
45      IC1=1
46      IC2=1
47      RETURN
C ** PARALLEL PLATE LIMITER
48      53 CONTINUE
49      DZ = RZEO * X(NT) / MR
C      LIMIT VALUE AND TANGENT VALUE SEARCH
50      DO 10 J=1,NT
51      DO 10 K=1,MR-2
52      DP1 = (PSIL(K+1,J)+PSIO(K+1,J)) - (PSIL(K,J)+PSIO(K,J))
53      DP2 = (PSIL(K+2,J)+PSIO(K+2,J)) - (PSIL(K+1,J)+PSIO(K+1,J))
54      IF(DP1.GT.0.0.AND.DP2.LT.0.0) GO TO 20
55      GO TO 10
56      20 IO = K + 1
57      JO = J
58      ABC=DABS(R(IO) * X(JO) - CO)
59      IF(ABC.LT.DZ) GO TO 2
60      10 CONTINUE
61      2 PSIC = PSIL(IO,JO) + PSIO(IO,JO)
62      IC1=JO
63      IC2=JO
64      RETURN
C ** JFT-2A TYPE MAGNETIC LIMITER
65      54 CONTINUE
66      MDIV=(AI(1)-RMIN)/DR+1
67      MAX=(RP-RMIN)/DR+1
68      ATAI=PSIL(MDIV,1)+PSIO(MDIV,1)
69      MSEP=MDIV
70      DO 61 I=MDIV+1,MAX
71      ASA=PSIL(1,1)+PSIO(1,1)
72      IF(ASA.GT.ATAI) GO TO 61
73      ATAI=ASA
74      MSEP=I
75      61 CONTINUE
76      IF(MSEP.EQ.MDIV.OR.MSEP.EQ.MAX) WRITE(6,300) ATAI,MSEP
77      PSIC=ATAI
78      IC1=MSEP
79      IC2=1
80      RETURN
C ** JT-60 TYPE MAGNETIC LIMITER
81      55 CONTINUE
82      MDIV=(AI(1)-RMIN)/DR+1
83      MIN=(RP-RMIN)/DR+1
84      ATAI=PSIL(MIN,1)+PSIO(MIN,1)
85      MSEP=MIN
86      DO 71 I=MIN+1,MDIV
87      ASA=PSIL(1,1)+PSIO(1,1)
88      IF(ASA.GT.ATAI) GO TO 71
89      ATAI=ASA
90      MSEP=I
91      71 CONTINUE
92      IF(MSEP.EQ.MDIV.OR.MSEP.EQ.MIN) WRITE(6,300) ATAI,MSEP
93      PSIC=ATAI
94      IC1=MSEP
95      IC2=1
96      RETURN

```

```

97 100 FORMAT(///' *** NOT DISCOVER THE MAX. POINT ON R-AXIS ***',
*      5X,'ATAI =',E12.5,5X,'MMM =',I5)
98 200 FORMAT(///' *** NOT DISCOVER THE MIN. POINT ON RP-DIVERTER LINE
***',5X,'ATAI =',E12.5,5X,'NTM =',I5,5X,'( MMM =',I5,' )')
99 300 FORMAT(///' *** NOT DISCOVER THE MIN. POINT ON R-AXIS ***',
*      5X,'ATAI =',E12.5,5X,'MSEP=',I5)
100      END

```

```

C *** AREA ***
C      THIS ROUTINE DICIDE @'S VALUE
C      IF PSIL(I,J) + PSIO(I,J) = PSIC
C          .GE. 0.0      @(I,J) = 1.0
C          .LT. 0.0      @(I,J) = 0.0
C
1      SUBROUTINE AREA(@, PSIL, PSIO, R, X)
C
2      COMMON / INPT / RZERO, THETA, MR, NT, LMAX, NUMAX, LMTTR, IC1, IC2,
*      CO, EPS, IPRT, ITST, IVERT, ISHAP, ICOIL
3      COMMON / FIXD / PSIC, DUM(6)
4      COMMON / CM1 / A, RP, DM1(4)
5      COMMON / RMIN / RMIN, DR, DTHTA
6      COMMON / NTMAX / NTM
7      DIMENSION @(MR, NT), PSIL(MR, NT), PSIO(MR, NT), RCMR)
8      DOUBLE PRECISION X(NT)
C
9      RSEP=R*(IC1)
10     MRMAX=MR
11     DO 10 J=1, NT
12     DO 10 I=1, MR
13     @(I, J) = 0.0
14     DO 20 J=1, NTM
15     I=0
16     IM2=0
17     IN2=0
18     IND=1
19     IF (LMTTR.NE.4.AND.LMTTR.NE.5) GO TO 50
20     IF (LMTTR.EQ.4) GO TO 30
21     IF (LMTTR.EQ.5) GO TO 40
22     30 RADI=RSEP/DSQRT(1.-X(J)**2)
23     I=IFIX((RADI-RMIN)/DR)+1
24     GO TO 30
25     40 RADI=MSEP/DSQRT(1.-X(J)**2)
26     MRMAX=IFIX((RADI-RMIN)/DR)+1
27     50 CONTINUE
28     I=I+1
29     IF (I.GT.MRMAX) GO TO 28
30     ATAI=PSIL(I, J) + PSIO(I, J) - PSIC
31     GO TO (22, 23), IND
32     22 IF (ATAI.LT.0.) GO TO 21
33     IM2=I
34     IND=2
35     GO TO 21
36     23 IF (ATAI.GE.0.) GO TO 21
37     IN2=I - 1
38     IF (IM2.EQ.IN2) GO TO 26
39     IF (J.EQ.1) GO TO 26
40     IF (IN2.GE.IM1.OR.IM2.LE.IN1) GO TO 26
41     IND=1
42     GO TO 21
43     26 DO 27 I=IM2, IN2
44     27 @(I, J)=1.
45     IM1=IM2
46     IN1=IN2
47     IF (IM1.EQ.IN1) GO TO 28
48     20 CONTINUE
49     28 CONTINUE
50     RETURN
51     END

```

```

C *** INTGL ***
C      INTEGRATION OVER PLASMA FOR PLASMA CURRENT
C
1  SUBROUTINE INTGL(S1,S2,S3,S4,DELTS1,DELTS2,@,R,X,MR,NT,
   1  PSIL,PSIO,PSIC)
C
2  DOUBLE PRECISION X(NT)
3  DIMENSION DELTS1(MR),DELTS2(MR),@(MR,NT),R(MR),SW(100),
   1  PSIL(MR,NT),PSIO(MR,NT)
C
4  SWRT(X)=DSQRT(X)
5  DO 100 J=2,NT-1
6  SW(J) = 0.0
7  DO 110 I=1,MR
8  SW(J) = SW(J) + DELTS1(I)*@(I,J)/R(I)*SQRT(1.0-X(J)*X(J))
9  100 CONTINUE
10 SW(1)=0.0
11 SW(NT) = 0.0
C
12 DO 120 I=1,MR
13 SW(I) = SW(I) + DELTS2(I)*@(I,1)/R(I)
14 SW(NT) = SW(NT) + DELTS2(I)*@(I,NT)/R(I)*SQRT(1.0-X(NT)*X(NT))
15 120 CONTINUE
16 S1 = 0.0
17 DO 130 I=1,NT
18 S1 = S1 + SW(I)
C
19 DO 210 J=2,NT-1
20 SW(J) = 0.0
21 DO 210 I=1,MR
22 SW(J) = SW(J) + (PSIL(I,J)+PSIO(I,J)-PSIC) *@(I,J)*DELTS1(I)
   * /R(I)*SQRT(1.0-X(J)*X(J))
C
23 SW(1) = 0.0
24 SW(NT) = 0.0
25 DO 220 I=1,MR
26 SW(I) = SW(I) + (PSIL(I,1)+PSIO(I,1)-PSIC) *@(I,1)*DELTS2(I)
   * /R(I)
27 SW(NT) = SW(NT) + (PSIL(I,NT)+PSIO(I,NT)-PSIC)*@(I,NT)*DELTS2(I)
   * /R(I)*SQRT(1.0-X(NT)*X(NT))
28 220 CONTINUE
29 S2 = 0.0
30 DO 230 I=1,NT
31 S2 = S2 + SW(I)
32 230 CONTINUE
C
33 DO 310 J=2,NT-1
34 SW(J) = 0.0
35 DO 310 I=1,MR
36 SW(J) = SW(J) + R(I)* SQRT(1.0-X(J)*X(J)) *DELTS1(I)*@(I,J)
C
37 SW(1) = 0.0
38 SW(NT) = 0.0
39 DO 320 I=1,MR
40 SW(1) = SW(1)+R(I)* SQRT(1.0-X(1)*X(1)) *DELTS2(I)*@(I,1)
41 SW(NT) = SW(NT)+R(I)* SQRT(1.0-X(NT)*X(NT)) *DELTS2(I)*@(I,NT)
42 320 CONTINUE
43 S3 = 0.0
44 DO 330 I=1,NT
45 S3 = S3 + SW(I)
46 330 CONTINUE
C
47 DO 410 J=2,NT-1
48 SW(J) = 0.0
49 DO 410 I=1,MR
50 SW(J) = SW(J)+R(I)* SQRT(1.0-X(J)*X(J)) * (PSIL(I,J)+PSIO(I,J)
   1 -PSIC) * @(I,J)*DELTS1(I)
51 410 CONTINUE
C
52 SW(1) = 0.0
53 SW(NT) = 0.0
54 DO 420 I=1,MR
55 SW(1) = SW(1)+R(I)* SQRT(1.0-X(1)*X(1)) * (PSIL(I,1)+PSIO(I,1)
   1 -PSIC) * @(I,1) *DELTS2(I)
56 SW(NT) = SW(NT)+R(I)* SQRT(1.0-X(NT)*X(NT))*(PSIL(I,NT)+PSIO(I,NT)
   1 -PSIC) * @(I,NT)*DELTS2(I)
57 420 CONTINUE
C
58 S4 = 0.0
59 DO 430 I=1,NT
60 S4 = S4 + SW(I)
61 430 CONTINUE
62 RETURN
63 END

```

```

C *** GNUTEST ***
C TEST OF GNU
C
1 SUBROUTINE GNUTES(MR,NT,JMAX,PPNU,GNU,FGNU,FUNC,Q,X)
C
2 DIMENSION PPNU(JMAX,NT),GNU(JMAX,NT),FGNU(MR,NT),FUNC(MR,NT),
* Q(MR,NT)
3 DOUBLE PRECISION X(NT)
C
4 DO 10 J=1,NT
5 DO 10 I=1,MR
6 FGNU(I,J)=0.
7 DO 20 J=1,NT
8 DO 20 I=1,MR
9 DO 20 L=1,JMAX
10 20 FGNU(I,J)=FGNU(I,J)+GNU(L,I)*(1.-X(J)**2)*PPNU(L,J)
11 DO 30 I=1,MR
12 DO 30 J=1,NT
13 PLSCRT=FUNC(I,J)*Q(I,J)
14 IF (PLSCRT.NE.0.) GO TO 40
15 FGNU(I,J)=ABS(FGNU(I,J))
16 GO TO 30
17 40 AA=ABS(PLSCRT-FGNU(I,J))
18 FGNU(I,J)=AA/ABS(PLSCRT)
19 30 CONTINUE
20 RETURN
21 END

C *** LASTOU ***
C OUTPUT OF RESULTS IF ITERATION OVER OR CONVERGED
C
1 SUBROUTINE LASTOU (PSIM,PSIO,FUNC,WK, MR,NT,
1 PSIC,AMUO,R,X,Q, LAST,DELTS1,DELTS2,PSIL,PSIOV,PSIOS,BZ )
C
2 COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,S1,S2,S3,S4,ISTEP
3 COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
4 COMMON/ EQIL / RCEN,RAXIS,ZAXIS,ELLIP,AVA,RMAG,ASPECT,S,V,BETA,
* PLSCRT,BPAV
5 DIMENSION PSIM(MR,NT),PSIO(MR,NT),FUNC(MR,NT),WK(MR,NT),R(MR)
6 DIMENSION Q(MR,NT),PSIL(MR,NT)
7 DOUBLE PRECISION X(NT)
C
C ITERATION NUMBER
8 WRITE(6,100) ISTEP
9 IF(LAST,EQ,0) GO TO 1
C
10 PSIL + PSIO -PSIC PRINT
11 DO 10 J=1,NT
12 DO 10 I=1,MR
13 PSIL(I,J) = PSIM(I,J) + PSIO(I,J)-PSIC
14 10 CONTINUE
15 WRITE(6,110)
16 CALL MATPR(PSIL,MR,NT)
C
C *** CHECK ***
16 WRITE(6,160)
17 CALL MATPR(WK,MR,NT)
18 SUMWK=0.
19 SUM=0.
20 NUM=0
21 DO 1000 I=1,MR
22 DO 1000 J=1,NT
23 SUMWK=SUMWK+WK(I,J)
24 IF(Q(I,J),EQ,0.) GO TO 1000
25 SUM=SUM+WK(I,J)
26 NUM=NUM+1
27 1000 CONTINUE
28 ERWK=SUMWK/FLOAT(MR*NT)
29 ERR=SUM/FLOAT(NUM)
30 WRITE(6,2000) ERWK,ERR
C
31 DO 30 J=1,NT
32 DO 30 I=1,MR
33 PSIL(I,J) = PSIL(I,J) + PSIC
34 30 CONTINUE
C
35 1 [PSI] = - FUNC / (AMUO * R*SQRT(1.0-X**2)) TPA16180
36 DO 20 J=1,NT TPA16200
37 DO 20 I=1,MR TPA16210
38 WK(I,J) = - FUNC(I,J) / (AMUO*R(I)*DSQRT(1.0-X(J)*X(J)))*Q(I,J) TPA16220

```

```

39      20 CONTINUE
40      WRITE(6,120)
41      CALL MATPR(WK,MR,NT)
42      CALL AAIP(WK,DELTS1,DELTS2)
43      WRITE(6,170)
44      CALL PBETA(PSIM,PSIO,Q,R,X,DELTS1,DELTS2,AMUO,FUNC )
45      WRITE(6,140)
46      WRITE(6,130) A11,A12,P1,P2,PSIC
47      WRITE(6,150) RCEN,AVA,RAXIS,ZAXIS,ASPECT,ELLIP,RMAG,PLSCRT,S,V,
      *      BETA,BPAV
48      IF ( IPLT .GE. 1 )
      *CALL PLOTR ( PSIOV,PSIOS,PSIO,PSIL,R,X,BZ,FUNC,WK)
49      RETURN
C
50      100 FORMAT(1H1//5X,'LAST ITERATION TIME IS',I4)
51      110 FORMAT(1H0,5X,'PSIP(I,J) + PSIO(I,J) = PSIC')
52      120 FORMAT(1H0//5X,'PLASMA CURRENT J(I,J)')
53      130 FORMAT(1H0,5X,'I1 =',E13,5,2X,'I2 =',E13,5,/,6X,'P1 =',E13,5,2X,
      *      'P2 =',E13,5/6X,'PSI CONST. =',E13,5////)
54      140 FORMAT(1H0//5X,'*** EQUILIBRIUM QUANTITIES ***'//)
55      150 FORMAT(10X,'MAJOR RADIUS',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'MINOR RADIUS(AVE)',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'R-SEMI AXIS',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'Z-SEMI AXIS',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'ASPECT RATIO',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'ELLIPTICITY',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'MAGNETIC AXIS',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'PLASMA CURRENT',F12,5,' (KA)')
      *      /10X,'CROSS SECTION',F12,5,' (M**2)')
      *      /10X,'VOLUME',F12,5,' (M**3)')
      *      /10X,'BETAP',F12,5,' (M)')
      *      /10X,'BETAP(AVE)',F12,5//////)
56      160 FORMAT(1H0//5X,'ERROR RATIO ')
57      170 FORMAT(1H1/)
58      2000 FORMAT(///5X,'*** AVERAGE ERROR ***' /
      *      10X,'ERROR(TOTAL) =',1PE12,5,5X,'AVERAGED OVER CALCULATED R
      *      *EGION'/10X,'ERROR(PLASMA) =',E12,5,5X,'AVERAGED OVER PLASMA CROSS S
      *      *ECTION')
59      END

```

```

C *** AAIP ***
C      PLASMA CURRENT
C
1      SUBROUTINE AAIP( CRNT,DELTS1,DELTS2 )
C
2      COMMON / INPT / RZERO,THETAO,MR,NT,DM1(12)
3      COMMON / EQIL / RCEN,RAXIS,ZAXIS,ELLIP,AVA,RMAG,ASPECT,S,V,BETA,
      *      PLSCRT,BPAV
C
4      DIMENSION CRNT(MR,NT), DELTS1(MR), DELTS2(MR)
5      AIP = 0.0
6      DO 10 I=1,MR
7      AIP = AIP + CRNT(I,1) * DELTS2(I) + CRNT(I,NT) * DELTS2(I)
8      10 CONTINUE
9      DO 20 J=2,NT-1
10     DO 20 J=1,MR
11     AIP = AIP + CRNT(I,J) * DELTS1(I)
12     20 CONTINUE
13     PLSCRT=AIP*2.0E-3
14     RETURN
15     END

```

```

C *** PBETA ***
C      CALCULATION OF EQUILIBRIUM VALUES
C
1      SUBROUTINE PBETA(PSIM,PSIO,Q,R,X,DELTS1,DELTS2,AMUO,P )
C
2      COMMON / INPT / RZERO,THETAO,MR,NT,DM(2),LMTTR,IC1,IC2,DM2(7)
3      COMMON / FIXD / PSIC,DM3(6)
4      COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,DM4(5)
5      COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
6      COMMON / EQIL / RCEN,RAXIS,ZAXIS,ELLIP,AVA,RMAG,ASPECT,S,V,BETA,
      *      PLSCRT,BPAV
7      DIMENSION PSIM(MR,NT), PSIO(MR,NT), Q(MR,NT), P(MR,NT),
      *      R (MR) , DELTS1(MR) , DELTS2(MR)

```

```

8      DOUBLE PRECISION X(NT)
9      DATA PAI / 3.14159 /
      C
      C      RCENTER,IC1,IC2,IC3
      C
10     DO 40 I=1,MR
11     40 IF(Q(I,1),NE,0.) GO TO 41
12     41 IC1=I
13     IC2=1
14     IF(IC1.EQ,1,OR,IC1.EQ,MR) GO TO 44
15     DO 42 I=IC1+1,MR
16     42 IF(Q(I,1),EQ,0.) GO TO 43
17     43 IC3=I-1
18     MRR=MR-1
19     IF(IC3.EQ,MRR) GO TO 44
20     RMIN=R(IC1)
21     RMAX=R(IC3)
22     RCEN=(RMIN+RMAX)/2,
      C
      C      BETA P
      C
23     PSIMX = 0.0
24     PSI = PSIM(IC1,IC2) + PSIO(IC1,IC2)
25     PSISUF=PSI
26     DO 10 J=1,NT
27     DO 10 I=1,MR
28     AA = ABS( Q(I,J)*(PSIM(I,J)+PSIO(I,J)) )
29     IF ( AA .LT. PSIMX ) GO TO 10
30     PSIMX = AA
31     ICMAX = I
32     10 CONTINUE
      C
33     BPAV = ( PSIMX-PSISUF) / ABS( R(ICMAX)**2 - R(IC1)**2 )
34     BPAV = BPAV * 2.0
      C
      C      PRESSURE = P
      C
35     DO 15 J=1,NT
36     DO 15 I=1,MR
37     PSI = PSIM(I,J) + PSIO(I,J)-PSISUF
38     P(I,J) = ( P1*PSI + 0.5*P2*PSI*PSI ) * Q(I,J)
39     15 CONTINUE
      C
40     S = 0.0
41     V=0.0
42     PP = 0.0
43     DO 20 I=1,MR
44     S = S + Q(I,1)*DELTS2(I) + Q(I,NT)*DELTS2(I)
45     V=V+2.*PAI*R(I)*DELTS2(I)*(Q(I,1)+Q(I,NT))*DSQRT(1,-X(NT)**2)
46     PP= PP + P(I,1)*Q(I,1)*DELTS2(I) + P(I,NT)*Q(I,NT)*DELTS2(I)
47     20 CONTINUE
48     DO 30 J=2,NT-1
49     DO 30 I=1,MR
50     S = S + Q(I,J)*DELTS1(I)
51     V=V+2.*PAI*R(I)*DSQRT(1,-X(J)*X(J))*Q(I,J)*DELTS1(I)
52     PP = PP + Q(I,J)*DELTS1(I)*P(I,J)
53     30 CONTINUE
      C
54     S=S*2.0
55     V=V*2.0
56     PAVE = PP*2.0
      C
57     BETA = 8.*PAI*PAVE / ( AMUO*PLSCRT**2)*1.0E-6
      C
      C      EQUILIBRIUM QUANTITIES
      C
58     RAXIS=RMAX-RCEN
59     ZAXIS=S/(PAI*RAXIS)
60     ELLIP=ZAXIS/RAXIS
61     AVA=SQRT(S/PAI)
62     RMAG=R(ICMAX)
63     ASPECT=RCEN/AVA
64     WRITE(6,200) LMTTR,IC1,IC2,IC3,PSISUF
65     RETURN
66     44 WRITE(6,100) IC1,IC3
67     RETURN
      C
68     100 FORMAT(1H0,5X,'*** PLASMA IS GONE AWAY ***',5X,'IC1 = ',I5,5X,
69     *      'IC3 = ',I5//)
70     200 FORMAT(1H0,5X,'*** PLASMA SURFACE *** LMTTR =',I5/10X,'IC1 = ',
71     *      I5,5X,'IC2 = ',I5,5X,'IC3 = ',I5,5X,'PSI(SURFACE) = ',
72     *      IPE12.5//)
73     END

```

```

C *** PLOTR ***
C      OUTPUT OF FIGURES TO GRAPHIC * COM *
C
1  SUBROUTINE PLOTR( PSIOV,PSIOS,PSIO,PSIL,R,X,BZ,P,CRNT)
C
2  COMMON / UNTP / ITPLT
3  COMMON / INPT / RZERO,THETA0,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTR,IC1,IC2,
   * CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
4  COMMON / RMIN / RMIN,DR,DTHTA
5  COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
6  COMMON / CMI / A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
7  COMMON / PLTF / AXFT,ICTA
8  COMMON / FIXD / PSIC,DM3(6)
9  COMMON / CRNT / AI(200),ZI(200),JI(200)
C
10 DIMENSION PSIOV(MR,NT), PSIOS(MR,NT), PSIO(MR,NT), PSIL(MR,NT),
   1 R(MR), BZ(MR,3), AXSR(4), AXSZ(4), AXSJ(4),
   2 P(MR,NT), CRNT(MR,NT), TMPX(102), TMPY(102)
11 DIMENSION BUFF(1024)
12 DOUBLE PRECISION X(NT)
13 REAL JI
14 DATA PAI / 3.14159 /
C
C
15 IF (IPLT, EQ, 1. OR, IPLT, EQ, 3) CALL PLOTS(BUFF(1), 1024)
16 IF (IPLT, GE, 2) REWIND ITPLT
17 DIST=30.0
18 MRM1 = MR - 1
19 XST = 0.0
20 XST = XST + DIST
21 IF (IPLT, GE, 2) READ(5, 140) AXFT, ICTA
22 140 FORMAT(F10.0, I5)
23 PRINT 150, PSIL(ICMAX, 1)
24 PRINT 160, ICMAX, R(ICMAX)
25 150 FORMAT('////////// ' PSIM+PSIO AT PLASMA CENTER =' , 1PE13.5)
26 160 FORMAT('D ICMAX =' , 14, ' R(ICMAX) =' , 1PE13.5)
C
C      PLOT OF BZ(IVERT) * PSIOV
C
27 IF ( IPLT1(1) , EQ, 0 ) GO TO 2000
28 IF ( IPLT1(1) , GE, 2 ) CALL TOKOSN(PSIOV,R,X,0,0)
29 IF ( IPLT1(1) , EQ, 2 ) GO TO 2000
30 CALL PLOT(XST, 0.0, -3)
31 DO 1010 I=1,MRM1
32   TMPX(I) = R(I)
33   TMPY(I) = BZ(I,2)
34 1010 CONTINUE
35 CALL SCALE ( TMPX, 200.0, MRM1, 1, 0.0 )
36 CALL SCALE ( TMPY, 200.0, MRM1, 1, 0.0 )
37 CALL AXIS(0,0,0,0,'R', -1, 200.0, 0.0, TMPX(MR), TMPX(MR+1), 0.0 )
38 CALL AXIS(0,0,0,0,'BZ', 2, 200.0, 90.0, TMPY(MR), TMPY(MR+1), 0.0 )
39 CALL SYMBOL(20,0,220,0, 5.0,'BZ DISTRIBUTION BY IVERT',0,0,24)
40 CALL FLINE(TMPX,TMPY, MRM1,1,0,0)
C
C      PLOT OF BZ(ISHAP) * PSIOS
C
41 2000 CONTINUE
42 IF ( IPLT1(2) , EQ, 0 ) GO TO 3000
43 IF ( IPLT1(2) , GE, 2 ) CALL TOKOSN( PSIOS,R,X, 0.0 )
44 IF ( IPLT1(2) , EQ, 2 ) GO TO 3000
45 CALL PLOT( 0.0,0.0, 666)
46 CALL PLOT(XST,0,0, -3)
C
47 DO 2010 I=1,MRM1
48   TMPX(I) = R(I)
49   TMPY(I) = BZ(I,1)
50 2010 CONTINUE
51 CALL SCALE ( TMPX, 200.0, MRM1, 1, 0.0 )
52 CALL SCALE ( TMPY, 200.0, MRM1, 1, 0.0 )
53 CALL AXIS(0,0,0,0,'R', -1, 200.0, 0.0, TMPX(MR), TMPX(MR+1), 0.0 )
54 CALL AXIS(0,0,0,0,'BZ', 2, 200.0, 90.0, TMPY(MR), TMPY(MR+1), 0.0 )
55 CALL SYMBOL(20,0,220,0, 5.0,'BZ DISTRIBUTION BY ISHAP',0,0,24)
56 CALL FLINE(TMPX,TMPY, MRM1,1,0,0)
C
C      PLOT OF BZ(TOTAL) * PSIO
C
57 3000 CONTINUE
58 IF ( IPLT1(3) , EQ, 0 ) GO TO 4000
59 IF ( IPLT1(3) , GE, 2 ) CALL TOKOSN( PSIO,R,X, 0.0 )
60 IF ( IPLT1(3) , EQ, 2 ) GO TO 4000
61 CALL PLOT( 0.0,0,0, 666)
62 CALL PLOT(XST,0,0, -3)

```

IC NO.11



```

63 C DO 3010 I=1,MRM1
64   TMPX(I) = R(I)
65   TMPY(I) = BZ(I,3)
66 3010 CONTINUE
67   CALL SCALE ( TMPX, 200.0, MRM1, 1, 0.0 )
68   CALL SCALE ( TMPY, 200.0, MRM1, 1, 0.0 )
69   CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'R', -1, 200.0, 0.0, TMPX(MR), TMPX(MR+1), 0.0 )
70   CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'BZ', 2, 200.0, 90.0, TMPY(MR), TMPY(MR+1), 0.0 )
71   CALL SYMBOL(20,0,220,0,5,0,'BZ DIST, BY IVERT, [SHAP', 0,0,23)
72   CALL FLINEX(TMPX,TMPY, MRM1,1,0,0)

C
C   PLOT OF JP(R),JP(Z),P(R),P(Z),PSIL
C
73 4000 CONTINUE
74   IF ( IPLT1(4) ,EQ, 0 ) GO TO 5000
75   IF ( IPLT1(4) ,GE, 2 ) CALL TOKOSN( PSIL,R,X, PSIC)
76   IF ( IPLT1(4) ,EQ, 2 ) GO TO 5000
77   CALL PLOT( 0.0,0.0, 666)
78   CALL PLOT(XST,0.0, -3)

C
79 DO 4010 I=1,MR
80   TMPX(I) = R(I)
81   TMPY(I) = CRNT(I,1)
82 4010 CONTINUE
83   CALL SCALE( TMPX, 200.0, MR, 1, 0.0)
84   CALL SCALE( TMPY, 200.0, MR, 1, 0.0)
85   CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'R', -1, 200.0, 0.0, TMPX(MR+1),TMPX(MR+2),
      * 0.0 )
86   CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'CURRENT', 7, 200.0, 90.0, TMPY(MR+1),
      * TMPY(MR+2), 0.0 )
87   CALL SYMBOL(20,0, 220,0,5,0,'CURRENT AT R AXIS', 0,0,17)
88   CALL FLINEX(TMPX,TMPY, MR, 1, 0.0 )

C
89   CALL PLOT( 0.0,0.0, 666)
90   CALL PLOT(XST, 0.0, -3)
91 DO 4020 I=1,MR
92   TMPY(I) = P(I,1)
93   IF ( P(I,1) ,LT, 0.0 ) TMPY(I) = 0.0
94 4020 CONTINUE
95   CALL SCALE( TMPX, 200.0, MR, 1, 0.0)
96   CALL SCALE( TMPY, 200.0, MR, 1, 0.0 )

C
97   CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'R', -1, 200.0, 0.0, TMPX(MR+1),TMPX(MR+2),
      * 0.0 )
98   CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'PRESSURE', 8, 200.0, 90.0, TMPY(MR+1),
      * TMPY(MR+2), 0.0 )
99   CALL SYMBOL(20,0,220,0,5,0,'RRESSURE AT R AXIS', 0,0,18)
100  CALL FLINEX(TMPX,TMPY, MR, 1, 0.0 )

C
101  CALL PLOT( 0.0,0.0, 666)
102  CALL PLOT(XST, 0.0, -3)
103  RADIUS=R(ICMAX)
104  THTMAX=ARCOS(R(ICMAX)/RZERO)
105  IF(LMTTR,EQ,2) THTMAX= ATAN(CZI(1)/AI(1))
106  ND=FIX(X(THTMAX/DTHTA)+1)
107  IF(LMTTR,EQ,2) ND=ND+5
108  DO 4030 I=1,ND
109  THETA=FLOAT(I-1)*DTHTA
110  TANTH=TAN(THETA)
111  IF( LMTTR , EQ, 2 )
      * RADIUS=Z1(1)*R(ICMAX)/(Z1(1)-(AI(1)-R(ICMAX))*TANTH)
112  RZ = RADIUS * TANTH
113  RX = RADIUS / COS(THETA)
114  TMPX(I) = RZ
115  ICM = IFIX ( (RX-RMIN)/DR ) + 1
116  ICM1= ICM-1
117  X1 = ( RX-R(ICM) ) / DR
118  X2 = 1. - X1
119  TMPY(I) = CRNT(ICM,I)*X2 + CRNT(ICM1,I)*X1
120 4030 CONTINUE

C
121  CALL SCALE( TMPX, 200.0, ND, 1, 0.0)
122  CALL SCALE( TMPY, 200.0, ND, 1, 0.0)
123  CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'Z',-1, 200.0, 0.0, TMPX(ND+1),TMPX(ND+2),
      * 0.0 )
124  CALL AXIS(0.0,0.0,0.0,'CURRENT',7, 200.0, 90.0, TMPY(ND+1),
      * TMPY(ND+2), 0.0 )
125  CALL SYMBOL(20,0, 220,0,5,0,'CURRENT AT Z AXIS', 0,0, 17 )
126  CALL SYMBOL(40,0,210,0,5,0,'R(ICMAX) = ',0,0,11)
127  CALL NUMBER(85,0,210,0,5,0,R(ICMAX),0,0,5)
128  CALL FLINEX( TMPX,TMPY, ND, 1, 0.0)

```

```

129 C CALL PLOT( 0,0,0.0, 666)
130 CALL PLOT(XST, 0,0, -3)
131 C RADIUS=R(ICMAX)
132 DO 4040 I=1,ND
133 THETA=FLOAT(I-1)*DTHTA
134 TANTH=TAN(THETA)
135 IF( LMTTR , EQ, 2 )
* RADIUS=Z1(1)*R(ICMAX)/(Z1(1)-(A1(1)-R(ICMAX))*TANTH)
136 RX = RADIUS / COS(THETA)
137 ICM = IFIX ( (RX-RMIN)/DR ) + 1
138 ICM1= ICM-1
139 X1 = ( RX-R(ICM) ) / DR
140 X2 = 1. - X1
141 TMPY(I) = P(ICM,1)*X2 + P(ICM1,1)*X1
142 IF ( TMPY(I) .LT. 0.0 ) TMPY(I) = 0.0
143 4040 CONTINUE
144 C CALL SCALE( TMPX, 200,0, ND, 1, 0,0)
145 CALL SCALE( TMPY, 200,0, ND, 1, 0,0)
146 CALL AXIS(0,0,0,0,'Z', -1, 200,0, 0,0, TMPX(ND+1),TMPX(ND+2),
* 0,0 )
147 CALL AXIS(0,0,0,0,'PRESSURE', 8, 200,0, 90,0, TMPY(ND+1),
* TMPY(ND+2), 0,0)
148 CALL SYMBOL(20,0,220,0,5,0,'PRESSURE AT Z AXIS', 0,0,18)
149 CALL SYMBOL(40,0,210,0,5,0,'R(ICMAX) = ',0,0,11)
150 CALL NUMBER(85,0,210,0,5,0,R(ICMAX),0,0,5)
151 CALL FLINE( TMPX,TMPY, ND, 1, 0,0)
152 C 5000 CONTINUE
153 IF ( IPLT ,EQ, 2 ) RETURN
154 CALL PLOT( 0. , 0., 999 )
155 RETURN
156 END

```

```

C *** TOKOSN ***
C OUTPUT TO M.T. FOR CONTOUR MAP BY * JGCP *
C
1 SUBROUTINE TOKOSN ( PSI, R, X, FNORM )
2 C
3 COMMON / INPT / RZERO,THETA0,MR,NT,DM(9),IVERT,ISHAP,ICOIL
4 COMMON / RMIN / RMIN,DR,DTHTA
5 COMMON / UNTP / ITPLT
6 COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
7 COMMON / PLTF / AXFT,ICTA
8 C
9 DIMENSION PSI(MR,NT), R(MR)
10 DOUBLE PRECISION X(NT)
11 C
12 ANORM = ABS ( FNORM )
13 C
14 DO 400 J=1,NT
15 Y=SNGL(X(J))
16 Z=SQRT(1,-Y*Y)
17 DO 400 I=1,MR
18 RR=R(I)*Z
19 RZ=R(I)*Y
20 PSP = PSI(I,J) - ANORM
21 WRITE ( ITPLT,150 ) RR, RZ, PSP, ICTA
22 400 CONTINUE
23 WRITE ( ITPLT,160 )
24 150 FORMAT('CNTL',3F10.4,36X,12)
25 160 FORMAT('BEND',76X)
26 PRINT 180, ANORM, FNORM
27 180 FORMAT('O NORMALIZATION FACTOR =',1PE13.5, ' PSI(IC1,IC2) =',E13.5)
28 RETURN
29 END

```

```

C *** RSTR ***
C READ-IN OF INPUT DATA FROM M.T. OR DISK
C
1 SUBROUTINE RSTR ( PSIL,PSIO,Q,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN )
C
2 COMMON / INPT / RZERO,THETA0,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTTR,IC1,IC2,
* CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
3 COMMON / FIXD / PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK
4 COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,S1,S2,S3,S4,ISTEP
5 COMMON / CM1 / A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
6 COMMON / RMIN / RMIN,DR,DTHTA
7 COMMON / RSIT / ITAPE1, ITAPE2, ITR, ITW
8 COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
9 DIMENSION PSIL(1), PSIO(1), Q(1),R(1),DELTS1(1), DELTS2(1),
* PPNU(1),BZ(1), AN(1)
10 DOUBLE PRECISION X(1)
C
11 IF(ISTEP.NE.0) GO TO 100
12 REWIND ITR
13 READ (ITR) RZERO,THETA0,MR,NT,NUMAX,LMTTR,IC1,IC2,
1 CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL,
2 PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK,RMIN,DR,DTHTA,
3 A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA,IPLT,IPLT1
14 MS = MR*NT
15 READ (ITR) (PSIL(I),I=1,MS), (PSIO(I),I=1,MS), (Q(I),I=1,MS),
* (R(I),I=1,MR), (X(I),I=1,NT), (DELTS1(I),I=1,MR),
* (DELTS2(I),I=1,MR), (PPNU(I),I=1,JMAX*NT),
* (BZ(I),I=1,3*MR), (AN(I),I=1,2*MR)
16 RETURN
17 100 READ (ITR) ISTEP,A11,A12,P1,P2
18 IF ( ISTEP.EQ. ISTEP ) GO TO 200
19 READ (ITR) DUMR
20 GO TO 100
21 200 READ (ITR) (PSIL(I),I=1,MS), (Q(I),I=1,MS)
22 ISTEP = ISTEP
23 REWIND ITR
24 RETURN
25 END

C *** RSTW ***
C WRITE-OUT OF OUTPUT DATA TO M.T. OR DISK
C
1 SUBROUTINE RSTW ( PSIL,PSIO,Q,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN )
C
2 COMMON / INPT / RZERO,THETA0,MR,NT,LMAX,NUMAX,LMTTR,IC1,IC2,
* CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL
3 COMMON / FIXD / PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK
4 COMMON / VRBL / A11,A12,P1,P2,S1,S2,S3,S4,ISTEP
5 COMMON / CM1 / A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA
6 COMMON / RMIN / RMIN,DR,DTHTA
7 COMMON / RSIT / ITAPE1, ITAPE2, ITR, ITW
8 COMMON / PLTR / IPLT,IPLT1(4),ICMAX
9 DIMENSION PSIL(MR,NT), PSIO(MR,NT), Q(MR,NT), R(MR), DELTS1(MR),
* DELTS2(MR), PPNU(JMAX,NT), BZ(MR,3), AN(MR,2)
10 DOUBLE PRECISION X(NT)
C
11 IF(ISTEP.NE.0) GO TO 100
12 REWIND ITW
13 WRITE (ITW) RZERO,THETA0,MR,NT,NUMAX,LMTTR,IC1,IC2,
1 CO,EPS,IPRT,ITST,IVERT,ISHAP,ICOIL,
2 PSIC,JMAX,AM1,AM2,AM3,AM4,CK,RMIN,DR,DTHTA,
3 A,RP,AIP,BETAP,BETAPD,GAMMA,IPLT,IPLT1
14 WRITE (ITW) PSIL,PSIO,Q,R,X,DELTS1,DELTS2,PPNU,BZ,AN
15 RETURN
16 100 WRITE (ITW) ISTEP,A11,A12,P1,P2
17 WRITE (ITW) PSIL,Q
18 RETURN
19 END

C *** OUTP ***
C PRINT OUT PSI
C
1 SUBROUTINE OUTP(PSIL,MR,NT,L)
C
2 DIMENSION PSIL(MR,NT)
3 WRITE(6,10) L
4 CALL MATPR(PSIL,MR,NT)
5 10 FORMAT(1HD,/,10X,' PSI(MR,NT) ITERATION TIME IS',I3)
6 RETURN
7 END

```

```

C *** MATPR ***
C PRINT OUT OF MATRIX DATA
C
1 SUBROUTINE MATPR (XYZ,MMM,NNN)
2 DIMENSION XYZ(MMM,NNN)
C
3 I12 = 0
4 I13 = (NNN+9)/10
5 DO 2 I=1,I13
6 I11 = I12 + 1
7 I12 = MIND(I11+9,NNN)
8 WRITE(6,10) (J,J=I11,I12)
C
9 DO 3 K=1,MMM
10 IF(K.EQ.1) GO TO 4
11 DO 6 J=I11,I12
12 IF(XYZ(K,J) .NE. XYZ(K-1,J) ) GO TO 7
13 CONTINUE
14 6 CONTINUE
15 IF (KE .EQ. KS) GO TO 8
16 KE=K
17 IF(K .EQ. MMM) GO TO 7
18 GO TO 3
19 8 IF(K .EQ. MMM) GO TO 4
20 DO 9 J=I11,I12
21 IF(XYZ(K,J) .NE. XYZ(K+1,J) ) GO TO 4
22 9 CONTINUE
23 KE = KE + 1
24 GO TO 3
25 7 IF(KE .EQ. KS ) GO TO 4
26 WRITE(6,20) KS,KE
27 IF(K .EQ. MMM .AND. KE .EQ. K ) GO TO 3
28 4 WRITE(6,20) K,(XYZ(K,J),J=I11,I12)
29 KS = K+1
30 KE = KS
31 3 CONTINUE
32 2 CONTINUE
33 10 FORMAT(2H0,' R',3X,'Z ',.13,9(6X,'Z ',.13) )
34 20 FORMAT(16,1P10E11,3)
35 30 FORMAT(8X,' X',15,' THROUGH X ',15,' SAME AS ABOVE')
36 RETURN
END

```

```

C *** FUNCTION SEKBN ***
C
1 FUNCTION SEKBN(A,H,N,I11)
2 DIMENSION A(100)
3 IF(N=100) 8,8,9
4 8 IF(N=2) 10,20,30
5 30 CALL SIMPIS(A,N,H,S,ILL)
6 SEKBN=S
7 I11=ILL
8 GO TO 6
9 20 SEKBN=0.5*(A(1)+A(2))*H
10 I11=0
11 GO TO 6
12 10 SEKBN=0.0
13 I11=0
14 GO TO 6
15 9 I11=1
16 6 RETURN
17 END

```

```

C *** FUNCTION TANZA ***
C
1 FUNCTION TANZA(A,H,N,I11)
2 DIMENSION A(100)
3 S=0.
4 DO 10 I=1,N
5 S=A(I)*H+S
6 10 CONTINUE
7 S=S-A(1)*H/2-A(N)*H/2
8 TANZA =S
9 I11=0
10 RETURN
11 END

```

付録 5-2 COMMON テーブル

ブロック名 サブルーチン名	INPUT	JACK	FIXD	VRBL	RSTT	UNTP	JKL	RMIN	PLTR	OM1	ORNT	NTMAX	EQUIL	PLTF
メイン・プログラム	○	○												
MAIN	○	○	○	○	○	○	○							
CLEAR	○													
PRAIN	○		○	○	○			○	○					
DELTS														
PNU														
YOSUCH							○			○				
KITAI										○				
CPSILO										○				
EXTER	○		○					○		○	○			
CCPSIM	○		○	○				○						
CONVG														
AREA	○		○					○		○		○		
PSICST								○		○	○	○		
INTGL														
GNUTES														
LASTOU				○					○	○			○	
AAIP	○												○	
PBETA	○		○	○					○				○	
PLOTR	○		○			○		○	○	○	○			○
TOKOSN	○					○		○	○					○
RSTR	○		○	○	○			○	○	○				
RSTW	○		○	○	○			○	○	○				
OUPT														
MATPR														
SEKBN														
TANZA														

INPUT

RZERO	半径方向計算領域の最大値 (m)
THETA 0	角度方向計算領域 (rad)
MR	半径方向メッシュ数
NT	角度方向メッシュ数
LMAX	逐次反復計算の最大回数
NUMAX	Legendre 陪函数の最大次数
LMTTR	リミタ型式指定 1: 固定点, 2: JT-4型, 3: 平面リミタ 4: JFT-2a型, 5: JT-60型
IC1	LMTTR=1の時固定点の { 半径方向メッシュ番号 角度方向 " }
IC2	
CO	LMTTR=3の時, 平面リミタのZ座標 (m)
EPS	逐次計算収束判定条件
IPRT	逐次計算途中結果出力オプション
ITST	g <sub>v</sub> 判定出力オプション
IVERT	外部導体の本数 (電流自動変動)
ISHAP	" (電流固定)
ICOIL	" 総数 = IVERT + ISHAP

JACK

JMAX	Legendre 陪函数用コア最大容量
------	---------------------

FIXD

PSIC	プラズマ表面の磁束函数 $\Psi_c$
JMAX	Legendre 陪函数用使用コア数 = $\frac{1}{2}(\text{NUMAX} + 1)$
AM1	} 未使用
AM2	
AM3	
AM4	
CK	IVERTコイルの電流に乗ずる係数

VRBL

AI 1	} プラズマ電流の係数 $j_{\phi} = R(P_1 + P_2 \cdot \Psi) + \frac{1}{R}(AI_1 + AI_2 \cdot \Psi)$
AI 2	
P 1	
P 2	
S 1	} プラズマ電流計算のための積分値 $I_p \equiv \int j_{\phi} ds = AI_1 \cdot S_1 + AI_2 \cdot S_2 + P_1 \cdot S_3 + P_2 \cdot S_4$
S 2	
S 3	
S 4	
I STEP	逐次計算の反復回数

RSTT

ITAPE 1	MTよりのデータ入力用オプション	0/1: 入力なし/入力あり
ITAPE 2	MTへのデータ出力用オプション	0/1: 出力なし/出力あり
ITR	データ入力用MT機器番号	
ITW	データ出力用MT	"

UNTP

ITPLT	等高線(JGPCP)用MT機器番号
-------	-------------------

JKL

AIP	プラズマ電流期待値 $I_{p0}$ (A)
-----	------------------------

RMIN

RMIN	半径方向計算領域の最小値 (m)
DR	半径方向メッシュ間距離 $\Delta r$ (m)
DTHTA	角度方向メッシュ間角度 $\Delta \theta$ (rad)

PLTR

IPLT	プロッタ出力オプション
IPLT 1 (1)	$B_{\psi}, \Psi_{0V}$ プロッタオプション
IPLT 1 (2)	$B_{\psi}, \Psi_{0s}$ "
IPLT 1 (3)	$B_{\psi}, \Psi_0$ "
IPLT 1 (4)	$j_{\phi}, p(\Psi), \Psi$ "

CM1

A	プラズマの平均副半径期待値	$a_{p0}$ (m)
RP	" 主半径 "	$R_{p0}$ (m)
AIP	電 流 "	$I_{p0}$ (A)
BETAP	" $\beta_P$ "	$\beta_P$ (一様電流分布)
BETAD	" " "	$\beta'_P$ (放物型電流分布)
GAMMA	" 電流分布指定	

CRNT

AI(200)	外部コイルの R座標 (m)
ZI(200)	" Z座標 (m)
JI(200)	" 電 流 (A)

NTMAX

NTM	LMTTR = 2の時 stagnation point を示す角度方向メッシュ番号 LMTTR $\neq$ 2の時 NTM = NT
-----	---

EQUIL

RCEN	計算終了時の $\Psi$ より求めたプラズマの主半径	$R_p$ (m)
RAXIS	R方向小半径	a (m)
ZAXIS	Z方向小半径	b (m)
ELLIP	楕円度	$x = b/a$
AVA	平均副半径	$\bar{a}_p$ (m)
RMAG	磁気軸主半径	$R_{MA}$ (m)
ASPECT	アスペクト比	$R_p/\bar{a}_p$
S	断面積	S (m <sup>2</sup> )
V	容 積	V (m <sup>3</sup> )
BETA	ベータ比	$\beta_P$
PLSCRT	電 流	$I_p$ (KA)
BPAV	ベータ比(簡易計算)	

PLTF

AXFT	JGPCP用 軸長スケールファクター (units/cm)
ICTA	" センタ・マーク指定



付録 5-3 シンボル テーブル

配列名

A(i) : 下記の一覧表の配列に配分する

X(i) = sin θ<sub>i</sub> : 角度方向メッシュ点での正弦 (倍精度)

K()	配列名	内 容	i	j
1	R(i)	半径方向メッシュ点の半径 (m)	MR	
2	DELTS1(i)	メッシュ点の面積要素 ΔS <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> ) 計算領域内部	MR	
3	DELTS2(i)	ΔS <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> ) " 境界	MR	
4	SS(i)	逐次計算時積分用	MR	
5	PSIO(i, j)	外部コイルによる磁束函数 $\psi_0 = \psi_{0v} + \psi_{0s}$	MR	NT
6	PSIL(i, j)	プラズマによる磁束函数 $\psi_p^l$	MR	NT
7	PSIM(i, j)	" $\psi_p^{l+1}$	MR	NT
8	WK(i, j)	途中作業用	MR	NT
9	PSIOS(i, j)	ISHAPコイルによる磁束函数 $\psi_{0s}$	MR	NT
10	PSIOV(i, j)	IVERT " $\psi_{0v}$	MR	NT
11	FUNC(i, j)	プラズマ電流密度 $j_\phi$	MR	NT
12	Q(i, j)	step function 0/1 : プラズマ内/外	MR	NT
13	GNU(i, j)	$g_\nu$ (3-5) 参照	JMAX	MR
14	PPNU(i, j)	Legendre 陪函数 $P_l^1(x_j)$	JMAX	NT
15	BZ(i, j)	R軸上垂直磁場 $B_v$ $j=1/2/3 : B_{vs}/B_{vv}/B_{vs} + B_{vv}$	MR	3
16	AN(i, j)	" n-index $j=1/2 : n_s/n_v$	MR	2