

JAERI-M

8413

核融合実験炉のMHD平衡

1979年9月

山本 孝*

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.

核融合実験炉のMHD平衡

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

山本 孝*

(1979年8月7日受理)

核融合実験炉(JXFR)第2次予備設計のMHD平衡パラメーターを決定するためにMHD平衡解析を行った。第1次予備設計に基づいて、プラズマ断面形状をアスペクト比 $A = 4.5$ の円形断面に固定し、平衡解のスケーリングを用いることによって、ポロイダルベータ β_p と電流密度分布の中数 α の二つのパラメーターに対してのみ計算を行った。設計値として選定されたMHD平衡パラメーターは、 $\beta_t = 2.5\%$, $\beta_p = 2.1$, $q_a = 2.55$, $I_p = 4.4 \text{ MA}$, $B_t = 5.5 \text{ T}$, $R = 6.75 \text{ m}$, $a = 1.5 \text{ m}$ である。さらに、これらの平衡パラメーターに対して外部磁場コイルの配置設計を行った。

*) 外来研究員：富士電機製造(株)

MHD Equilibrium Analysis of JAERI Experimental Fusion Reactor

Takashi YAMAMOTO*

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 7, 1979)

MHD equilibrium analysis was made to determine equilibrium parameters of the JXFR for the second preliminary design. Plasma shape was fixed to the circular cross-section of $A=4.5$ on the basis of the first preliminary design of JXFR. By scaling of the equilibrium solutions, calculation was thus made for the two parameters of poloidal beta (β_p) and current density profile exponent (α).

Equilibrium parameters chosen as the design values are $\beta_t=2.5\%$, $\beta_p=2.1$, $q_a=2.55$, $I_p=4.4\text{MA}$, $B_t=5.5\text{T}$, $R=6.75\text{m}$ and $a=1.5\text{m}$. External field coil configuration was designed for these equilibrium parameters.

Keywords: Experimental Fusion Reactor, Design Study,
MHD Equilibrium, External Field Coil,
Equilibrium Parameters

* On leave from Fuji Electric Co., Ltd., Kawasaki

目 次

1. はじめに	1
2. 計算式	4
2.1 平衡の式	4
2.2 境界条件	5
2.3 数値解法	5
2.4 平衡量の計算	7
2.5 平衡解のスケーリング	8
2.6 外部平衡磁場	9
3. 実験炉平衡パラメータ計算	10
3.1 計算条件	10
3.2 計算結果	10
3.3 設計値の選定	11
付 録 MHD平衡計算コードマニュアル	21

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Calculational Model	4
2.1 Equilibrium Equation	4
2.2 Boundary Condition	5
2.3 Numerical Solution	5
2.4 Solutions of Equilibrium Quantities	7
2.5 Scaling of Equilibrium Solutions	8
2.6 External Equilibrium Field	9
3. MHD Equilibrium Analysis of the JXFR	10
3.1 Calculational Condition	10
3.2 Results	10
3.3 Choice of the Design Value	11
Appendix MHD Equilibrium Code Manual	21

1. はじめに

核融合実験炉第1次予備設計^[1]において炉心プラズマの基本的な諸パラメーターの選定、及び解析がなされ、炉を構成する各コンポーネントについても設計が行われた。本報告は第2次予備設計にあたり炉心プラズマの平衡パラメーターを決定するために行ったMHD平衡解析について述べたものである。

炉心プラズマの設計において最も基本的なことはMHD平衡が成り立っていることである。本来MHD平衡は輸送及びMHD安定性と密接な関りがあり、プラズマ起動時から輸送方程式、MHD方程式と組み合わせて安定なMHD平衡を得る様にすべきものである。しかしながら現段階ではこの様なシミュレーションを行える状況ではなく、それぞれ単独に解析が行われているのが現状である。従ってここで行われるMHD平衡の解析においても平衡の式(Grad-Shafranov方程式)を解くのに必要なプラズマ圧力とトロイダル磁束関数の分布を単独に適当な関数型で与えている。

一般に平衡の式を解く際に外部磁場を境界条件として与える方法(外部コイル、導体シェル等による)とプラズマの形状を特定する方法とがある。本報告では平衡のパラメーターを選定するために多数の平衡解が必要である上に、条件を一定にする必要から後者(固定境界法)を用い、更にポロイダルベータ β_p とプラズマ電流 I_p を目的値に収束させる方法を採用している。

平衡計算の変数となるパラメーターは数多く、その全てを変数とするには膨大な数の平衡計算が必要となる。

ここでは第1次予備設計を基にアスペクト比 $A=4.5$ の円形断面プラズマに形状を固定し、スケーリング計算を用いることによってポロイダルベータ β_p と電流分布の中数 α のみを変数として計算を行った。Fig. 1.1に第2次予備設計における実験炉(JXFR)の概観図を、またTable 1.1に主要諸元を示す。

Table 1.1 Main design parameters of JXFR (2nd preliminary design)

Power		Neutronics	
Fusion power (MW)	125	Neutron current at	
Thermal power (MW)	140	1-st wall ($n\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	9.5×10^{12}
Electrical power (MW), Gross	-	Neutron wall loading (MW m^{-2})	0.2
Net	-	First wall displacement	
Net thermal efficiency	-	damage rate (dpa y^{-1})	0.8
Wall loading (MW/m^2)	0.3	Max. helium production rate	
		in 1-st wall (appm y^{-1})	9.4
Operation mode		Max. hydrogen production rate	
Operation period (s)	180	in 1-st wall (appm y^{-1})	29
Burn time (Flat top) (s)	100	Tritium breeding ratio	0.9
Duty factor	0.6	Nuclear heating per	
Plant availability	0.5	DT neutron (MeV n^{-1})	16.1
Load factor	0.3	Total induced activity at	
Reactor dimensions		one hour after shutdown (Ci)	
Major radius (m)	6.75	(after one year operation)	9.1×10^7
Plasma radius (m)	1.5		
First wall radius (m)	1.75	Toroidal field magnet	
Plasma volume (m^3)	300	Number of coils	16
Plasma		Bore, width/height (m)	7/11
Mean temperature (keV)	7	Magnetomotive force (MAT)	186
Mean ion density (10^{14} cm^{-3})	1.1	Max. field strength (T)	11
Mean electron density (10^{14} cm^{-3})	1.4	Stored energy (GJ)	50
Effective charge	1.9	SCM material	Nb_3Sn
Confinement time (s)	7.2	Neutral beam injector	
Injection power (MW)	26	Number of ion sources	24
Toroidal field (T)	5.5	Deuterium beam energy (keV)	200
Safety factor	2.5	Injection power (MW)	32
Poloidal beta	2.1	Power efficiency	0.3
Toroidal beta	0.025	Cooling system	
Plasma current (MA)	4.4	Number of loops	4
Blanket structure		Coolant, pressure (kg cm^{-2})	He, 10
Blanket module/Reactor	8	Inlet/outlet temp. ($^{\circ}\text{C}$)	300/500
Blanket cells/Blanket module	284	Flow rate (kg/s)	143
Injection and evacuation		Secondary system	He
hole/Blanket module	1	Third system	Air cooler
Nominal max. 1-st wall temp. ($^{\circ}\text{C}$)	520	Tritium inventory (kg)	
Materials		Fuel recirculating system	0.3
Structural material	316SS	Tritium recovery system	
Blanket fertile material	Li_2O	including blanket	0.1
Reflector material	Stainless steel & W	Total inventory including storage	0.5

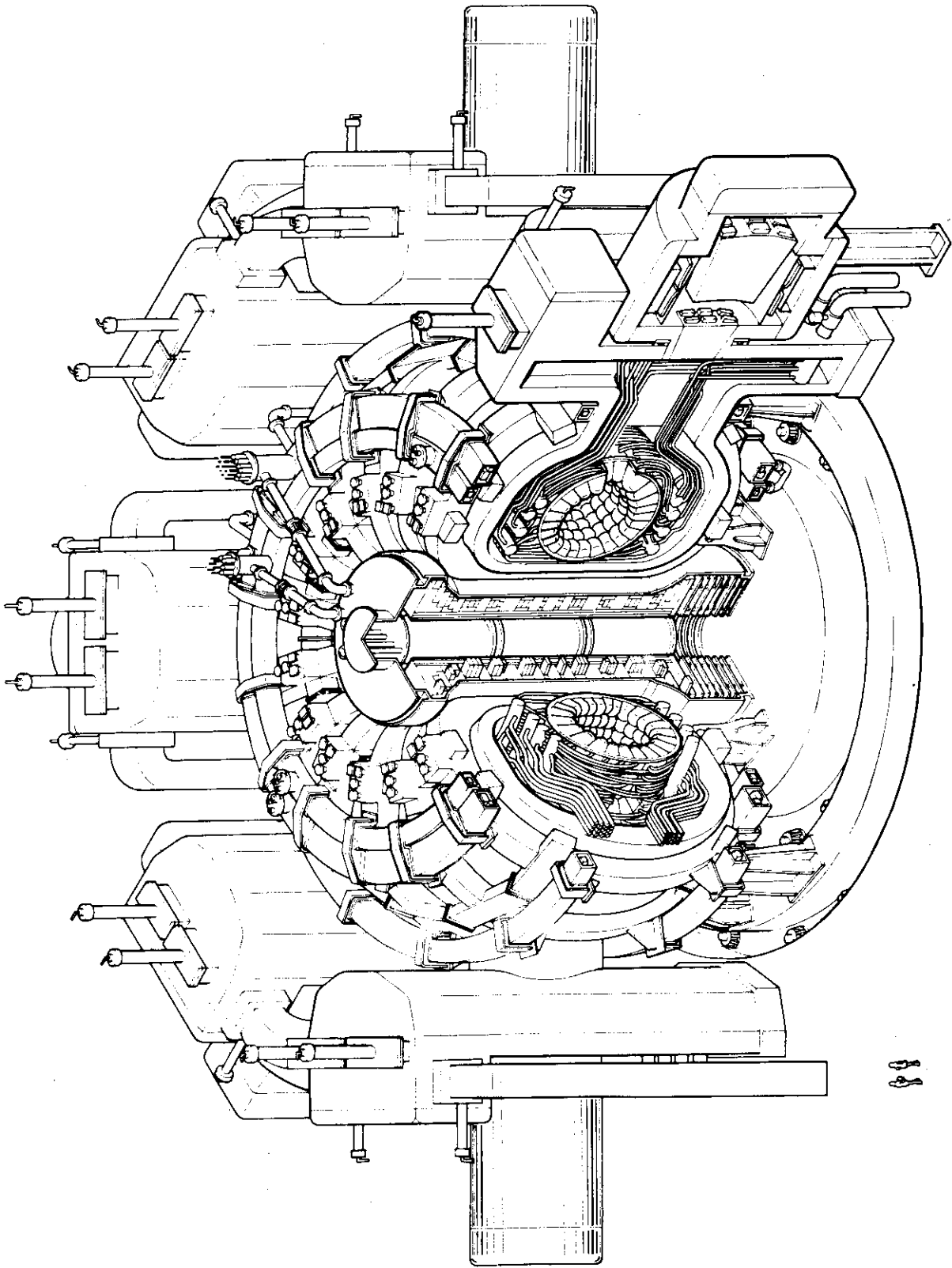


Fig.1.1 Overview of the reactor (the first preliminary design)

2. 計 算 式

2.1 平衡の式

良く知られた軸対称系における平衡の式は、トーラスの中心軸をZ軸にとる円柱座標系 (r, θ, z) において、ポロイダル磁束関数 ψ を用いて次の様に表わされる。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \mu_0 r^2 \frac{dP(\psi)}{d\psi} + \frac{\mu_0^2}{8\pi^2} \frac{dT^2(\psi)}{d\psi} = 0 \quad (2.1)$$

プラズマ電流の各方向成分は

$$j_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$j_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.3)$$

$$j_\theta = r \frac{dp}{d\psi} + \frac{\mu_0}{8\pi^2 r} \frac{dT^2}{d\psi} \quad (2.4)$$

また磁場の各方向成分は

$$B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (2.6)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 T(\psi)}{2\pi r} \quad (2.7)$$

(2.1) 式を解くためには $p(\psi)$ と $T(\psi)$ の関数型を与える必要がある。これは本来輸送方程式と組み合わせて、平衡状態に至るプラズマの形成過程をシミュレートして得られるものであるが、ここではあらかじめ任意の関数型を与えるものとする。ここで用いた $p(\psi)$ と $T(\psi)$ の関数型は次に示す型のものである。

$$p(\psi) = p_0 \psi^\delta \quad (2.8)$$

$$T^2(\psi) = T_0^2 \psi^\delta + G \quad (2.9)$$

ここでポロイダル磁束関数 ψ は便宜上プラズマ境界で0, 磁気軸上で極大値を取る様に設定した。 δ はトロイダル電流分布を定める定数で, $\delta = 1$ の時トロイダル電流分布は ψ に依存しない形となり, いわゆるフラット分布となる。(2.8)と(2.9)式を(2.1)式に代入すると

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \mu_0 \delta p_0 r^2 \psi^{\delta-1} + \frac{\mu_0^2}{8 \pi^2} \delta T_0^2 \psi^{\delta-1} = 0 \quad (2.10)$$

ここで定数部分をそれぞれ $C_a = \mu_0 \delta p_0$, $C_b = \mu_0^2 \delta T_0^2 / 8 \pi^2$, $\alpha = \delta - 1$, と置き換えると上式は次の様に表わされる。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + (C_a r^2 + C_b) \psi^\alpha = 0 \quad (2.11)$$

この式は C_a , C_b , α を適当に与えることによって解け, 与えられた α によって特長づけられる電流分布を持ち, C_a , C_b の値によって決まるプラズマ電流とポロイダルベータ値を持つ解が得られる。

2.2 境界条件

前節で示した平衡の式(2.11)はプラズマの内部で成立する式である。従ってプラズマ断面の形状を予め与えておき, プラズマ表面のポロイダル磁束関数の値を与えればプラズマ内部での解を得ることが出来る。即ち固定境界法と呼ばれる方法である。プラズマの平衡パラメーターを求める場合はプラズマ内部の解だけで十分であるが, 平衡を保つための外部平衡磁場が必要な場合には別に計算しなければならない。ここで用いる固定境界法に必要な境界条件はプラズマの断面形状, つまり境界の幾何学的形状と境界上のポロイダル磁束関数 ψ の値とである。(2.8), (2.9), (2.11)式からわかる様に境界上で $\psi = 0$ としており, またプラズマ内部の ψ が正になる様にしている。プラズマ境界は下記に示す式で決定しているので任意の形状を計算することは出来ない。

$$r = R_0 + a \cos(\theta + \delta \sin \theta)$$

$$z = a \kappa \sin \theta$$

ここで R_0 は主半径, a はプラズマ半径, κ は楕円度, δ は三角形度である。

2.3 数値解法

正方格子による有限差分近似を用いる。Fig. 2.1で境界近傍の格子点B0の階差式は境界上の点B1, B2, B3と格子点B4及びB0の関数值 $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_0$ を用いて次の様に表わされる。

$$\frac{\partial^2 \psi_0}{\partial r^2} = \frac{2}{h^2} \left(\frac{\psi_1}{\xi_1 (\xi_1 + \xi_3)} - \frac{\psi_0}{\xi_1 \xi_3} + \frac{\psi_3}{\xi_3 (\xi_1 + \xi_3)} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial r} = \frac{1}{h} \left(\frac{\xi_3 \psi_1}{\xi_1 (\xi_1 + \xi_3)} + \frac{(\xi_1 - \xi_3) \psi_0}{\xi_1 \xi_3} - \frac{\xi_1 \psi_3}{\xi_3 (\xi_1 + \xi_3)} \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_0}{\partial z^2} = \frac{2}{h^2} \left(\frac{\psi_2}{\xi_2 (1 + \xi_2)} - \frac{\psi_0}{\xi_2} + \frac{\psi_4}{1 + \xi_2} \right) \quad (2.14)$$

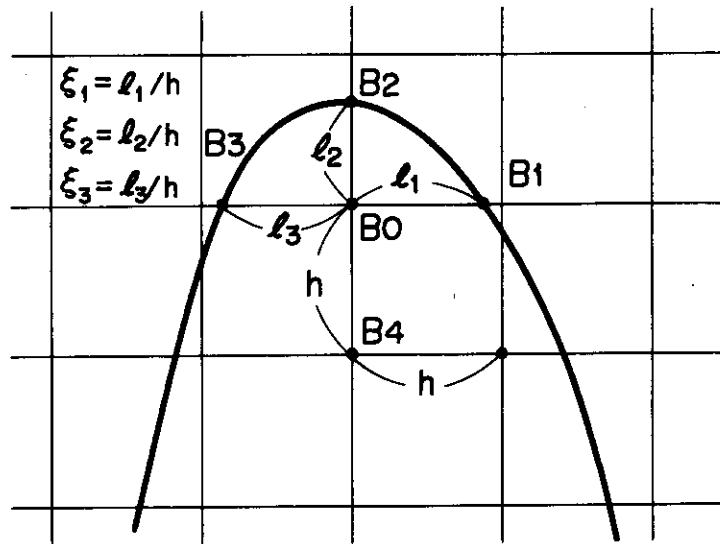


Fig. 2.1

ここで h は正方格子の格子点間距離であり、 $\xi_1 \sim \xi_3$ はそれぞれ点 B_0 から $B_1 \sim B_3$ までの距離と h との比を表わしたものである。この階差式を使って (2.11) 式を表わすと 次の様になる。

$$\begin{aligned} & \left(2 - \frac{\xi_{3,i,j} h}{r_0 + ih} \right) \frac{\psi_{i+1,j}}{\xi_{1,i,j} (\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j})} - \left(2 + \frac{(\xi_{1,i,j} - \xi_{3,i,j}) h}{r_0 + ih} \right) \frac{\psi_{i,j}}{\xi_{1,i,j} \xi_{3,i,j}} \\ & + \left(2 + \frac{\xi_{1,i,j} h}{r_0 + ih} \right) \frac{\psi_{i-1,j}}{\xi_{3,i,j} (\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j})} + \frac{2 \psi_{i,j+1}}{\xi_{2,i,j} (1 + \xi_{2,i,j})} - \frac{2 \psi_{i,j}}{\xi_{2,i,j}} \\ & + \frac{2 \psi_{i,j-1}}{1 + \xi_{2,i,j}} + \{ (r_0 + ih)^2 C_a + C_b \} h^2 \psi_{i,j}^a = 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

上記連立方程式をA.D.I法によって解く。加速パラメーター ρ を使って(2.15)式の r, z 各方向のA.D.I反復式は次の様に表わされる。

$$\begin{aligned} & \left(2 - \frac{\xi_{3,i,j} h}{r_0 + ih}\right) \frac{(\xi_{1,i,j} - \xi_{3,i,j}) h}{\xi_{1,i,j} (\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j})} \psi_{i+1,j}^{(k+\frac{1}{2})} - \left(2 + \frac{(\xi_{1,i,j} - \xi_{3,i,j}) h}{r_0 + ih}\right) \left(\frac{1}{\xi_{1,i,j} \xi_{3,i,j}} + \rho\right)^{(k+\frac{1}{2})} \psi_{i,j} \\ & + \left(2 + \frac{\xi_{1,i,j} h}{r_0 + ih}\right) \frac{(\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j}) h}{\xi_{3,i,j} (\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j})} \psi_{i-1,j}^{(k+\frac{1}{2})} = - \frac{2^k \psi_{i,j+1}}{\xi_{2,i,j} (1 + \xi_{2,i,j})} + \left(\frac{2}{\xi_{2,i,j}} + \rho\right)^k \psi_{i,j} \\ & - \frac{2^k \psi_{i,j-1}}{1 + \xi_{2,i,j}} - (C_a (r_0 + ih)^2 + C_b) h^2 k \psi_{i,j}^\alpha \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{2^{(k+1)} \psi_{i,j+1}}{\xi_{2,i,j} (1 + \xi_{2,i,j})} + \left(\rho - \frac{2}{\xi_{2,i,j}}\right)^{(k+1)} \psi_{i,j} + \frac{2^{(k+1)} \psi_{i,j-1}}{1 + \xi_{2,i,j}} \\ & = - \left(2 - \frac{\xi_{3,i,j} h}{r_0 + ih}\right) \frac{(\xi_{1,i,j} - \xi_{3,i,j}) h}{\xi_{1,i,j} (\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j})} \psi_{i+1,j}^{(k+\frac{1}{2})} + \left(2 + \frac{(\xi_{1,i,j} - \xi_{3,i,j}) h}{r_0 + ih}\right) \\ & \times \left(\frac{1}{\xi_{1,i,j} \xi_{3,i,j}} + \rho\right)^{(k+\frac{1}{2})} \psi_{i,j} - \left(2 + \frac{\xi_{1,i,j} h}{r_0 + ih}\right) \frac{(\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j}) h}{\xi_{3,i,j} (\xi_{1,i,j} + \xi_{3,i,j})} \psi_{i-1,j}^{(k+\frac{1}{2})} \\ & - (C_a (r_0 + ih)^2 + C_b) h^2 (k+\frac{1}{2}) \psi_{i,j}^\alpha \end{aligned} \quad (2.17)$$

加速パラメーター ρ は計算条件により適当な値を決める、また収束の判定は下記の条件で行う。

$$\left| \frac{\psi_{i,j}^{(k+1)} - \psi_{i,j}^{(k)}}{\psi_{i,j}^{(k+1)}} \right| < \epsilon \quad (2.18)$$

2.4 平衡量の計算

平衡の式(2.11)を解いて得られたポロイダル磁束関数 ψ より(2.4), (2.8), (2.9)式を用いて、プラズマ圧力分布 p , トロイダル電流密度 j_θ , トロイダル磁束関数 T 等が求まる。また(2.5), (2.6)式よりポロイダル磁場 B_p が求まるので、これらの値により平衡の諸量は次の様に表わされる。

$$I_p = \oint_{\psi_B} \frac{B_p}{\mu_0} d\ell \quad (2.19)$$

$$q(\psi) = T(\psi) \oint_{\psi} \frac{d\ell}{2\pi r^2 B_p} \quad (2.20)$$

$$\beta_p = \frac{2\mu_0 \bar{p}}{\langle B_p^2 \rangle} \quad (2.21)$$

$$\beta_t = \frac{2\mu_0 \bar{p}}{B_{t_0}^2} \quad (2.22)$$

$$\bar{p} = \int p \, dv / \int dv \quad (2.23)$$

$$\langle B_p^2 \rangle = \oint_{\psi_B} B_p^2 \, d\ell / \oint_{\psi_B} d\ell \quad (2.24)$$

ここで I_p はプラズマ全電流, β_p はポロイダルベータ, β_t はトロイダルベータ, B_{t_0} はプラズマ中心のトロイダル磁場であり, $\oint_{\psi} d\ell$ は磁気面上の周回積分を表わし, ψ_B はプラズマ表面の磁束関数である。体積々分 $\int dv$ は各格子点での値の和として算出し, 周回積分は各磁気面を磁気軸を中心にして角度分割し, 分割した磁気面上の値を格子点からの内挿によって求めて総和する方法を用いている。

ところで, ここに求めた平衡の諸量は (2.11) 式の任意定数 C_a, C_b, α のある値に対するものである。従って求めようとする平衡 (例えば $\beta_p = 1.8, I_p = 3 \text{ MA}$ の平衡解) を得るためには適当な定数の値を与えて平衡を解き, その結果計算された平衡量を求めたい平衡量と比較し, 定数 C_a, C_b, α の値を修正して再び平衡を解くという繰り返し収束の方法を採らねばならない。ここではプラズマ全電流 I_p とポロイダルベータ値 β_p について, この繰り返し収束を行っているが q や β_t についても同様のことが可能である。

2.5 平衡解のスケーリング

アスペクト比とプラズマ断面形状が一定であり, かつポロイダルベータ値とトロイダル電流分布を表わす巾数 α が一定であれば平衡解のスケーリング則が成立する。今既知の平衡解の諸量を添字 0 をつけて表わし, スケーリング則によって求める平衡量を添字 1 をつけて表わす。既知の平衡解での主半径 R_{m0} と求めたい平衡解の主半径 R_{m1} との比を $\zeta = R_{m1} / R_{m0}$ とし, プラズマ全電流とトロイダル磁場に対するものをそれぞれ次の様に定める。

$$\sigma = I_{p1} / I_{p0} \quad (2.25)$$

$$\eta = B_{t1} / B_{t0} \quad (2.26)$$

これらの比 ζ, σ, η を用いて平衡量は次の様に表わされる。

$$\psi_1(r, z) = \zeta \sigma \psi_0(r, z) \quad (2.27)$$

$$p_1(r, z) = \zeta^{-2} \sigma^2 p_0(r, z) \quad (2.28)$$

$$j_{\theta 1}(r, z) = \zeta^{-2} \sigma j_{\theta 0}(r, z) \quad (2.29)$$

$$B_{p1}(r, z) = \zeta^{-1} \sigma B_{p0}(r, z) \quad (2.30)$$

$$\beta_{11} = \zeta^{-2} \sigma^2 \eta^{-2} \beta_{10} \quad (2.31)$$

$$C_{a1} = \zeta^{-3-\alpha} \sigma^{1-\alpha} C_{a0} \quad (2.32)$$

$$C_{b1} = \zeta^{-1-\alpha} \sigma^{1-\alpha} C_{b0} \quad (2.33)$$

$$G_1 = \zeta^2 \eta^2 G_0 \quad (2.34)$$

$$q_1(\psi_1) = \left[\frac{\zeta^2 \eta^2 \sigma^{-2} G_0 + Q_0(\psi_0)}{G_0 + Q_0(\psi_0)} \right]^{1/2} q_0(\psi_0) \quad (2.35)$$

$$Q_0(\psi_0) = \frac{2 C_{b0}}{1+\alpha} \psi_0^{\alpha+1}$$

$$G_0 = R_{m0}^2 B_{10}^2$$

ここで C_a, C_b, α は (2.11) 式の定数であり G は (2.9) 式に示される定数である。

2.6 外部平衡磁場

前に述べたように固定境界法による平衡計算コードでは外部平衡磁場が求まらないので別に計算する必要がある。平衡解よりポロイダル磁束関数 ψ とトロイダル電流密度 j_θ の分布が既知であるから、各メッシュで環状線電流の近似を用い、下記の式によってプラズマ電流のみによるポロイダル磁束関数 ψ_p が得られる。

$$\psi_p(r_1, z_1; r_0, z_0) = \frac{\mu_0 i}{\pi k} \sqrt{r_1 r_0} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\}$$

$$k^2 = \frac{4 r_1 r_0}{(r_1 + r_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}$$

ここで r_1, z_1 は計算点の座標、 r_0, z_0 は環状線電流 i が流れるメッシュ点の座標であり $K(k), E(k)$ はそれぞれ第1種、第2種の完全楕円積分である。この様にして得られた ψ_p の分布と ψ との差から外部平衡磁場が求まる。このプラズマ領域での平衡磁場分布を実現する平衡磁場コイルの配置と電流は既存の計算コード^[2]によって求めることが出来る。

3. 実験炉平衡パラメーター計算

3.1 計算条件

核融合実験炉第1次予備設計⁽¹⁾におけるプラズマ条件を基本とし、主半径6.75 m、プラズマ半径1.5 mの円形断面プラズマを固定計算条件とした。2.5節で述べた様にスケーリングのもととなる平衡のパラメーターのうちアスペクト比とプラズマ断面形状が固定されるのでポロイダルベータ β_p とトロイダル電流分布の中数 α をパラメーターとして平衡計算を行えば良い。スケーリング計算の際にパラメーターとなる主半径、トロイダル磁場、プラズマ電流のうち主半径は6.75 mに固定されている。またトロイダル磁場に関しては第1次予備設計の値6 Tより下げることとし、プラズマ中心磁場5.5 Tとした。またMHD安定性の条件より磁気軸上の安全係数 q_m を1.0以上にすることが要求されるので、(2.35)式で $q_1(\psi_{m1}) = 1.0$ (ψ_{m1} は磁気軸上の磁束関数)とすると、

$$\sigma = \left[\frac{\zeta^2 \eta^2 G_0}{\left\{ \frac{1}{q_0(\psi_{m0})} \right\}^2 \{ G_0 + Q_0(\psi_{m0}) \} - Q_0(\psi_{m0})} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

主半径とトロイダル磁場に対応すると η は固定されているので、 $q_m = 1.0$ の制約条件の下で各平衡解に対するスケーリング計算で σ 即ちプラズマ電流が決定される。

3.2 計算結果

平衡計算は $\beta_p = 1.6 \sim 2.5$ 、 $\alpha = 0.1 \sim 0.5$ の値に対して行い、主半径1.0 m、プラズマ電流100 kA、トロイダル磁場1.0 Tで規格化している。メッシュ分割数はプラズマ水平断面を60分割する正方メッシュとし、収束判定値は 2×10^{-5} とした。スケーリング計算は前節で述べた様に $q_m = 1.0$ となる様な σ に対して行われた。結果を q_a と β_1 の空間に β_p 、 α 、 I_p をパラメーターとしてプロットしたものをFig. 3.1に示す。この図は $B_t = 5.5$ Tに対するものであるが、トロイダル磁場に対するスケーリングは(3.1)式より $q_0(\psi_{m0}) = 1.0$ を入れ $\sigma = \zeta$ が得られる。主半径は固定されているので $\zeta = 1.0$ であるからプラズマ電流 I_p とトロイダル磁場 B_t は1対1に対応する。また上式 $\sigma = \zeta \eta$ を(2.31)、(2.35)式に代入することにより q_a 、 β_1 は不変であることがわかる。つまりFig. 3.1は異なる B_t の値に対しても I_p を B_t に1対1にスケーリングするだけで対応出来る。図で $\beta_p = 2.5$ の線分に沿う領域ではトーラスの内周でトロイダル電流の反転が生じる、従って $\beta_p = 2.5$ 以上の領域は平衡解として好ましくない。トロイダルベータ値 β_1 を上げるためには I_p 及び β_p を上げればよいが、 I_p を増やせばプラズマ表面の安全係数 q_a が下がり、また q_m を1に制約しているために電流分布の幅数 α を下げて、より平坦な分布にしななければならない。これに対して β_p を上げれば、 α は下げる必要があるが、 q_a は逆に上昇する。

これはトロイダル効果により電流分布がトーラスの外周側に偏っていくためである。従って β_t を上げるためには出来るだけ大きな β_p 値を採る方が有利である。しかし一方電流分布の偏りは、それが大きければトーラスの内周でトロイダル電流の反転を生じ、そこまでいかなくとも大きく偏った電流分布を維持し、制御していくことは簡単なことではない。

3.3 設計値の選定

平衡パラメーターの選定は本来各平衡解に対するMHD安定性の解析を行うことにより求められるべきものであるが、ここでは安定性の一般的な条件として磁気軸上の安全係数 q_m を1.0とし、更にプラズマ表面の安全係数 q_m を2.5以上とする条件を付加した。核融合実験炉(JXFR)第2次予備設計の平衡パラメーターはFig. 3.1で上記の条件を採り、更に可能なトロイダルベータ値 β_t 及び適当なポロイダルベータ値 β_p を勘案してTable 3.1に示す様な設計値を選定した。 $\beta_t = 2.5\%$ においてパワーバランスの計算より得られた核融合出力は125 MWとなった。これにより第2次予備設計の当初の目標であったトロイダル磁場 B_t を下げ、ベータ値 β_t を上げるということを達成出来ることになった。

選定された設計値に対して計算された平衡解をFig. 3.2～Fig. 3.8に示す。必要な外部平衡磁場を実現するコイルの配置、及び電流値を「非線型計画法によるトカマク装置の外部磁場コイルの最適配位計算コード」^[2]を用いて設計した。平衡磁場コイルの位置は分解修理の容易さ、放射線損傷(超電導コイルのため)等の考慮からトロイダルコイルの外側とした。今後プラズマの位置、形状制御の必要性から補助コイル(常電導)をトロイダルコイルの内側に置くことも考えられる。Fig. 3.9に平衡磁場コイルの配置及びコイル電流を示す。設計された平衡磁場コイルによって実現される外部平衡磁場の磁束、プラズマ電流のみによるポロイダル磁場の磁束、及びこの二つの和による全ポロイダル磁場の磁気面をFig. 3.10～Fig. 3.12に示す。図中点線で示してあるのはプラズマ表面の位置である。

Table 3.1 Equilibrium Parameters of the JXFR

Beta poloidal, β_p	2.1
Beta toroidal, β_t	0.025
Safety factor, q_m (at magnetic axis)	1.0
q_a (at plasma surface)	2.55
Magnetic axis, R_m	7.103 m
Major radius, R	6.75 m
Plasma radius, a	1.5 m
Aspect ratio, A	4.5
Profile exponent, α	0.5
Toroidal field, B_t	5.5 T
Plasma current, I_p	4.4 MA

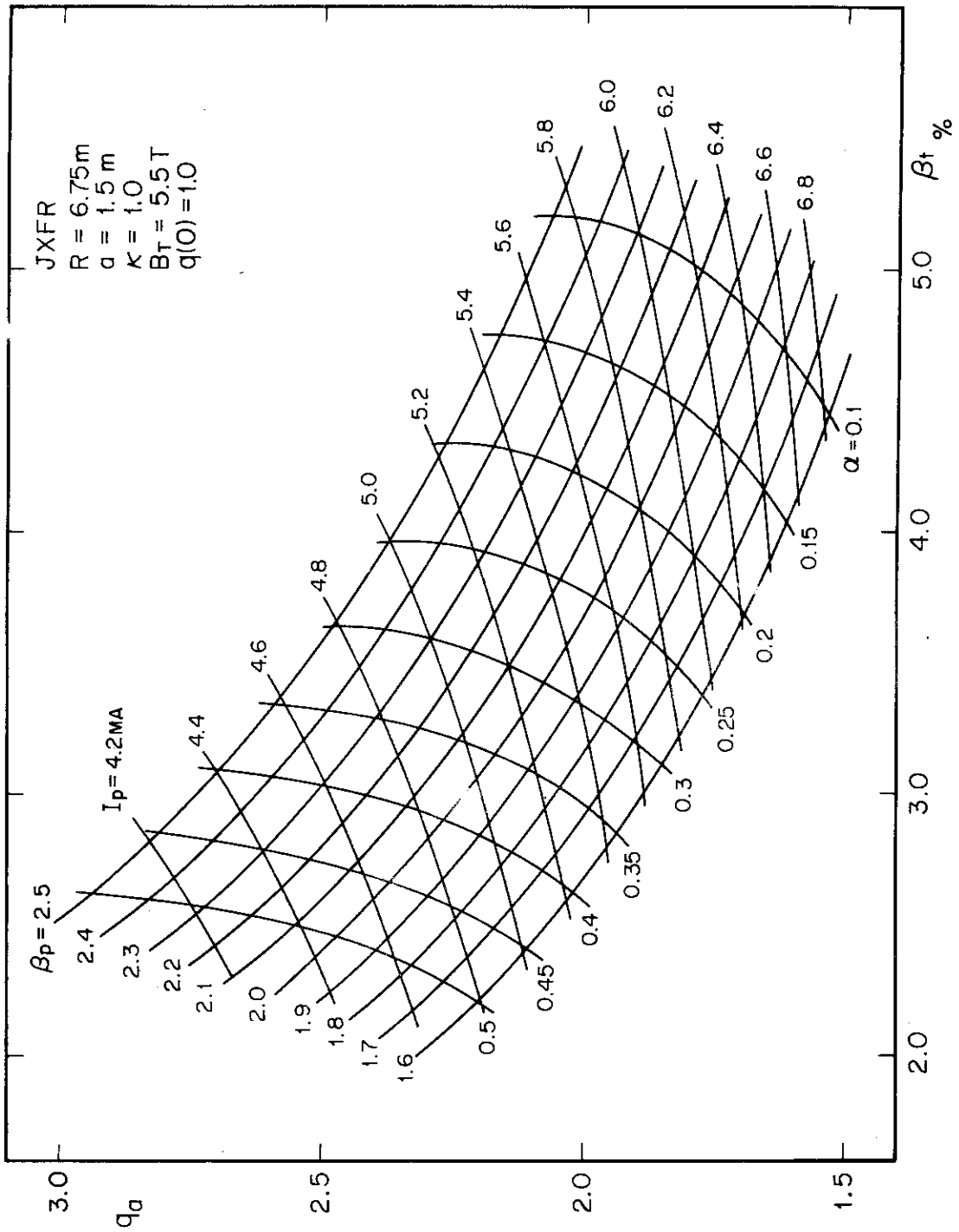
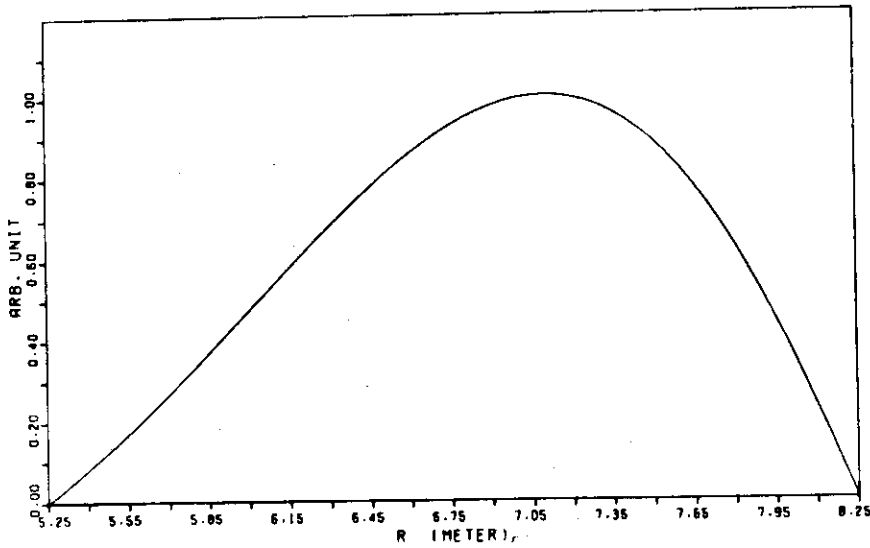


Fig. 3.1 MHD Equilibria at $A=4.5$, $B_t=5.5\text{T}$

POLOIDAL FLUX FUNCTION PROFILE

MAX. FLUX FUNCTION = 4.174E+00

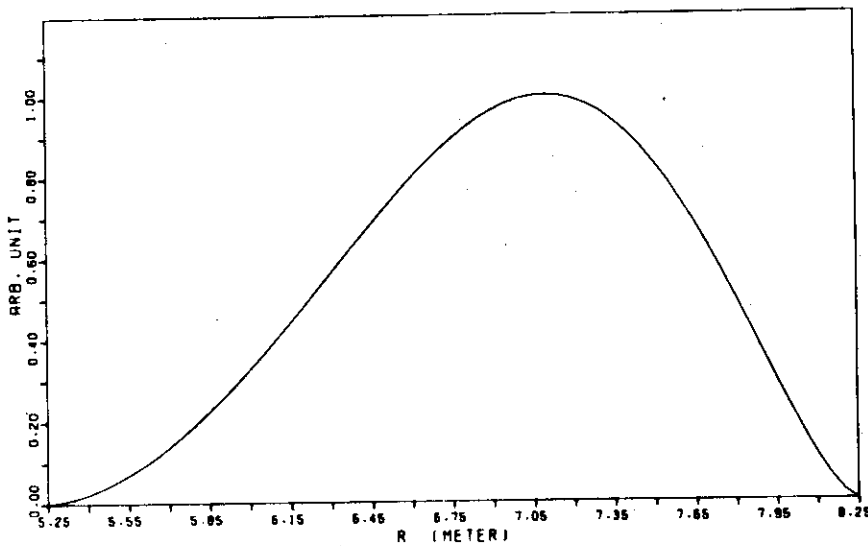


MAJOR RADIUS 6.75 METER
MINOR RADIUS 1.50 METER
ELLIPTISITY 1.00
TRIANGULARITY 0.00
PLASMA CURRENT 4.40 MA
BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.2

PLASMA PRESSURE PROFILE

MAX. PLASMA PRESSURE = 8.685E+05

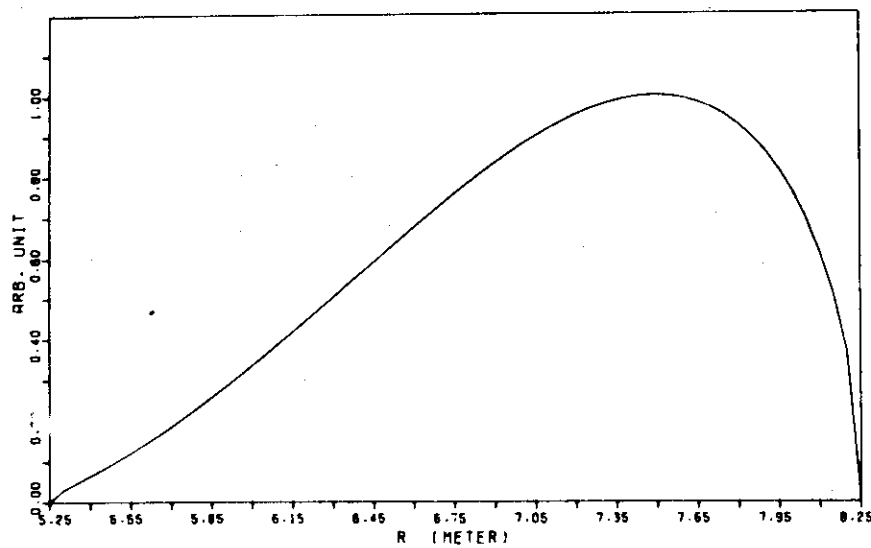


MAJOR RADIUS 6.75 METER
MINOR RADIUS 1.50 METER
ELLIPTISITY 1.00
TRIANGULARITY 0.00
PLASMA CURRENT 4.40 MA
BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.3

CURRENT DENSITY PROFILE

MAX. CURRENT DENSITY = 1.253E+06

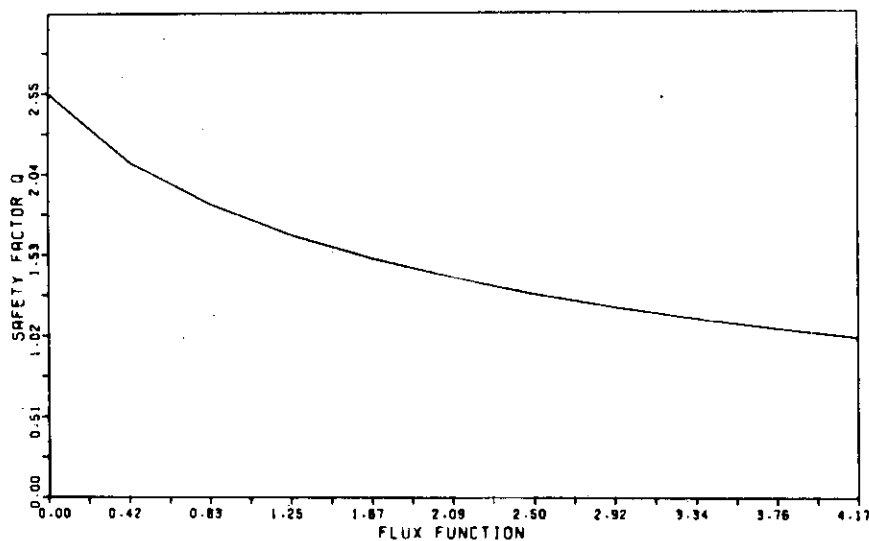


MAJOR RADIUS 6.75 METER
 MINOR RADIUS 1.50 METER
 ELLIPTICITY 1.00
 TRIANGULARITY 0.00
 PLASMA CURRENT 4.40 MA
 BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.4

SAFETY FACTOR PROFILE

SURFACE VALUE OF Q = 2.55E+00

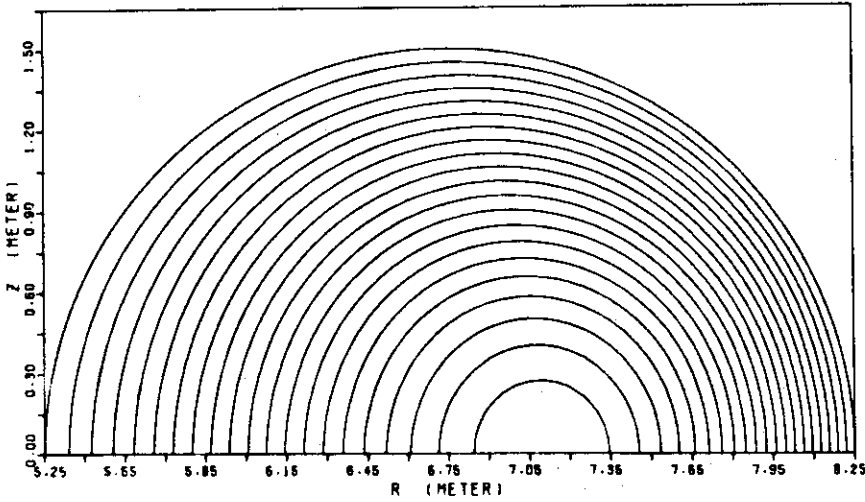


MAJOR RADIUS 6.75 METER
 MINOR RADIUS 1.50 METER
 ELLIPTICITY 1.00
 TRIANGULARITY 0.00
 PLASMA CURRENT 4.40 MA
 BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.5

POLOIDAL FIELD FLUX SURFACES

MIN. VALUE = 0.0 MAX. VALUE = 4.174E+00 INCREMENT = 2.000E-01

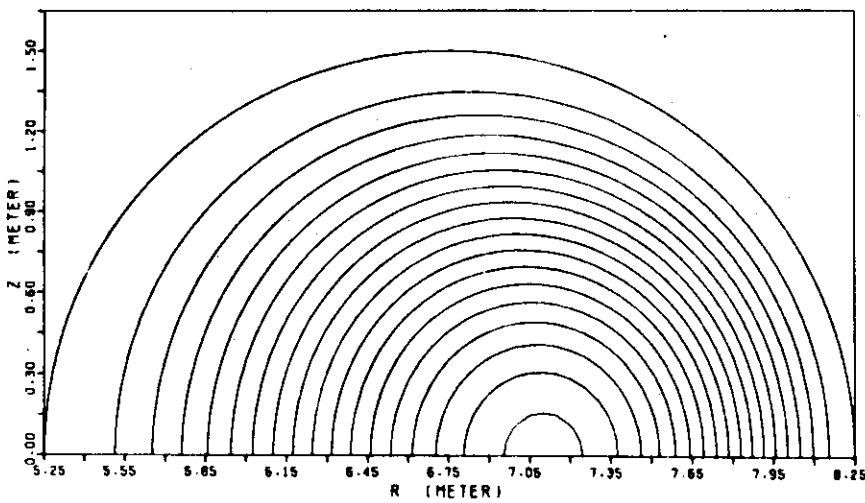


MAJOR RADIUS 6.75 METER
 MINOR RADIUS 1.50 METER
 ELLIPTISITY 1.00
 TRIANGULARITY 0.00
 PLASMA CURRENT 4.40 MA
 BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.6

PLASMA PRESSURE CONTOURS

MIN. VALUE = 0.0 MAX. VALUE = 8.685E+05 INCREMENT = 5.000E+04



MAJOR RADIUS 6.75 METER
 MINOR RADIUS 1.50 METER
 ELLIPTISITY 1.00
 TRIANGULARITY 0.00
 PLASMA CURRENT 4.40 MA
 BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.7

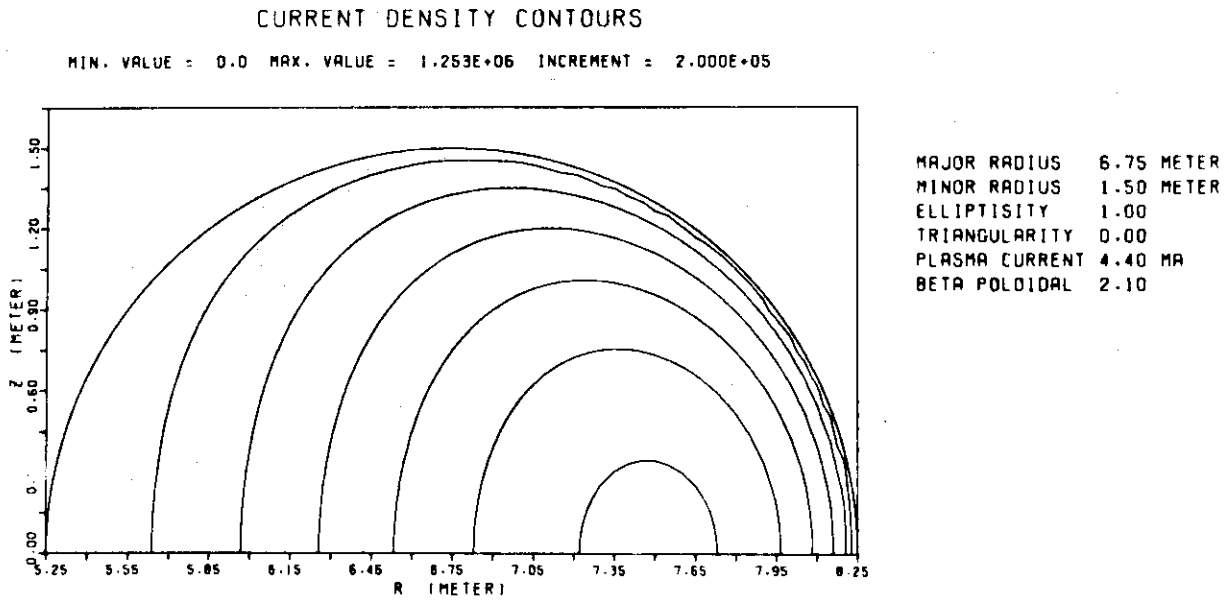


Fig. 3.8

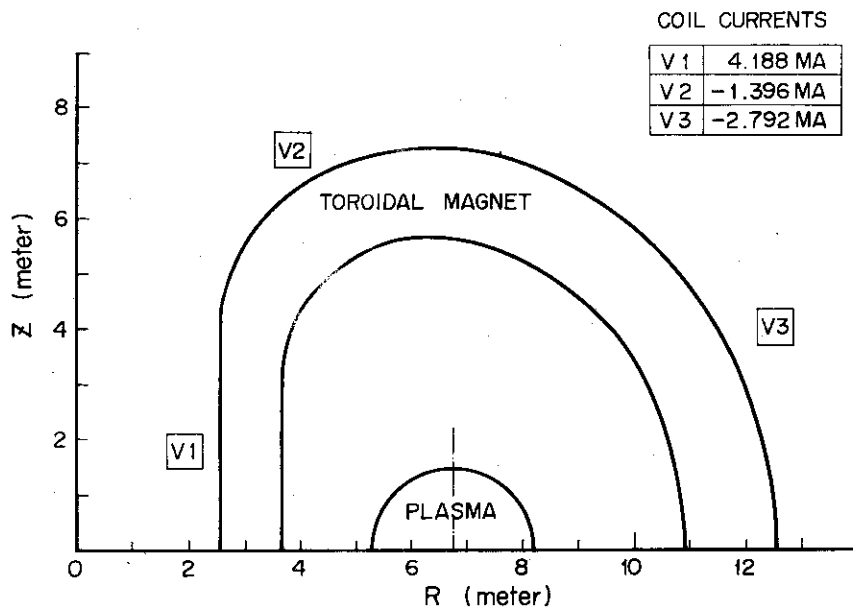
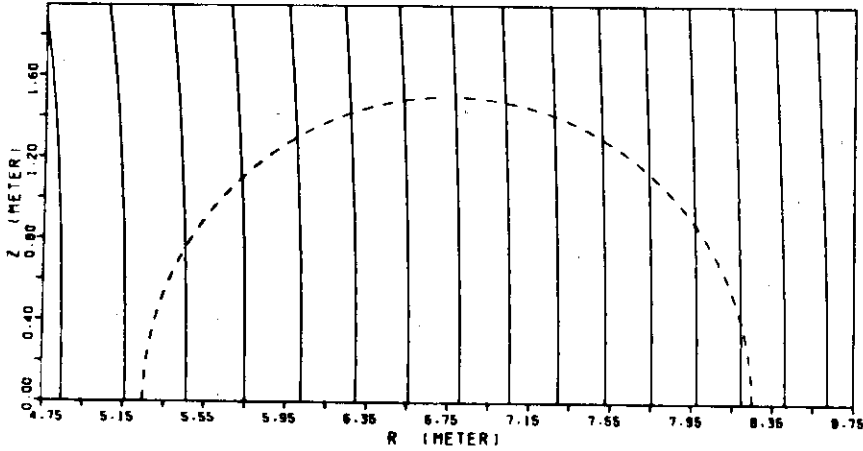


Fig.3.9 Configuration and Currents of the Equilibrium Field Coils

EXTERNAL FIELD FLUX SURFACES

MIN. VALUE = -9.493E+00 MAX. VALUE = -1.351E+00 INCREMENT = 5.000E-01

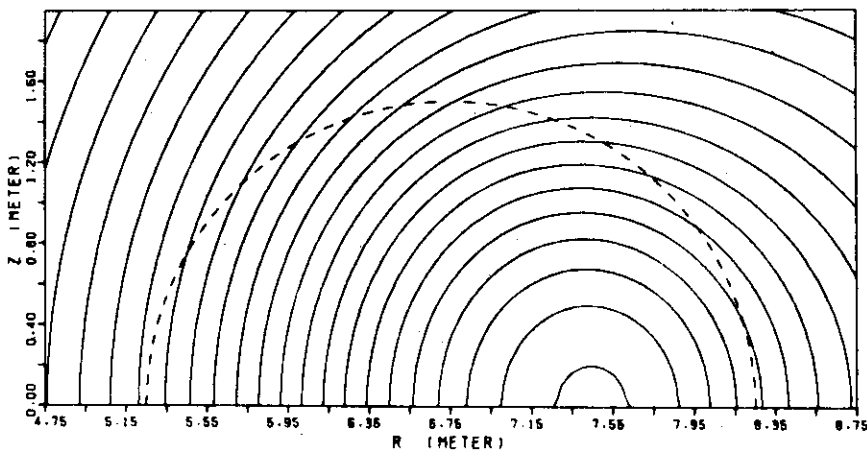


MAJOR RADIUS 6.75 METER
 MINOR RADIUS 1.50 METER
 ELLIPTISITY 1.00
 TRIANGULARITY 0.00
 PLASMA CURRENT 4.40 MA
 BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.10

PLASMA FIELD FLUX SURFACES

MIN. VALUE = 4.353E+00 MAX. VALUE = 1.512E+01 INCREMENT = 5.000E-01

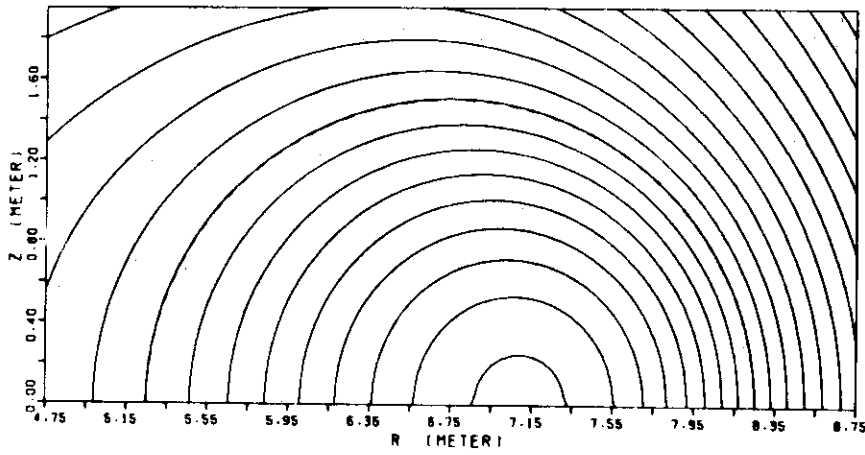


MAJOR RADIUS 6.75 METER
 MINOR RADIUS 1.50 METER
 ELLIPTISITY 1.00
 TRIANGULARITY 0.00
 PLASMA CURRENT 4.40 MA
 BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.11

TOTAL POLOIDAL FIELD FLUX SURFACES

MIN. VALUE = -7.664E-01 MAX. VALUE = 9.155E+00 INCREMENT = 5.000E-01



MAJOR RADIUS 6.75 METER
MINOR RADIUS 1.50 METER
ELLIPTISITY 1.00
TRIANGULARITY 0.00
PLASMA CURRENT 4.40 MA
BETA POLOIDAL 2.10

Fig. 3.12

謝 辞

本報告をまとめるに当り数々の有益な助言を頂いた迫室長始め炉設計研究室の方々に深く感謝致します。

REFERENCES

- [1] 炉設計研究室： "核融合実験炉第1次予備設計", JAERI-M 7300 (1977)
- [2] Toi, K. Takeda, T. : "Numerical Method to Obtain an Optimum Configuration of External Magnetic Field Coils in Tokamak Device by Non-Linear Programming", JAERI-M 6018 (1975)

付録 MHD平衡計算コードマニュアル

A1 全体の構成

この計算コード系はMHD平衡パラメーター選定のための固定境界法によるMHD平衡計算コード・FIBERを中心とし、平衡解のスケーリングを行うコード・SCAL、外部平衡磁場を計算するコード・EXEC、平衡磁場コイル配位最適化コード・OPTBVS、作図プログラム・PLTEQ1, PLTEQ2から成っている。Fig. A. 1に各コード間の関係を示す。MHD平衡パラメーターの選定に当ってはFIBERでプラズマ断面形状、アスペクト比A、ポロイダルベータ β_p 、電流分布 α をパラメータにして一連の平衡解をデータファイル・F 40に出力し、スケーリング計算コード・SCALで他の平衡量をパラメトリックに計算する。また平衡パラメーターが選定された場合には、SCALを用いて磁気軸上の安全係数 q_m が1.0になる様なプラズマ電流を求め、これをFIBERに入れて目的の平衡解をデータファイル・F 20, F 30に出力する。これを基にその平衡解に対応する外部平衡磁場をEXECで、平衡磁場コイルの配置をOPTBVSで計算する。なお作図プログラムは計算部分と作図部分とを分けて二つになっている。

A2 プログラムの構成

A.2.1 FIBER

構成図をFig. A. 2に示す。プログラムの流れはFig. A. 3のフローチャートに示す。各サブルーチンの内容は以下に示す通りである。

1) FBEQUL (メインルーチン)

- インプットデータの入出力
- 初期値の計算→CALL BOUND
- 差分式の数値計算→CALL SABUN
- 平衡量の計算→CALL EQUIBM

$$\circ \text{収束の判定} \quad \left| \frac{AIPL}{AIP\phi} - 1.0 \right| < SHU$$

$$\left| \frac{BEP}{BEP\phi} - 1.0 \right| < SHU$$

- 安全係数の計算→CALL ANZN
- 出力制御

LP OUTPUT → CALL OUT1

外部平衡磁場計算用DISK (JCC(1)=1の場合) → CALL OUT2

スケーリング計算用DISK (JCC(2)=1の場合) → CALL OUTSCL

2) BOUND (初期値の計算)

- 各メッシュ点の ψ の初期値の計算 → CALL CIRRA
 - プラズマ境界のメッシュ間位置の計算 → CALL CIRZT
- プラズマ形状を定める式は下記で定義

$$\left. \begin{aligned} r &= R_0 + a \cos(\theta + \delta \sin \theta) \\ z &= \kappa a \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad A-1$$

ここで κ は楕円度, δ は三角形度である。

3) SABUN (差分式の数値計算)

- r 方向のADI 反復式の係数の計算 → F01 ~ F09
- r 方向の前進解 → CALL GAUELS
- z 方向のADI 反復式の係数の計算 → F11 ~ F19
- z 方向の前進解 → CALL GAUELS
- 収束の判定

$$\frac{FI(I, J) - FIT(I, J)}{FI(I, J)} < SA$$

4) EQUIBM (平衡量の計算)

- 各メッシュの面積, メッシュ中心の座標と ψ の計算
 - 平均圧力, 全電流の計算
 - プラズマ表面上のポロイダル磁場の計算 → CALL BOMEG
 - ポロイダルベータ, トロイダルベータの計算
- ポロイダルベータ β_p の定義は
- $$JCC(11) = 1 \text{ の場合 } \beta_p = 2 \mu_0 \bar{P} / \langle B_p^2 \rangle$$
- $$JCC(11) \approx 1 \text{ の場合 } \beta_p = 2 \mu_0 \bar{P} / B_a^2$$
- $\langle B_p^2 \rangle$ は BOMEG で計算される。 B_a は $B_a = \frac{\mu_0 I_p}{2 \pi a}$
- プラズマ電流 I_p は

$$JCC(12) = 1 \text{ の場合 } I_p = \oint_{\psi_B} \frac{B_p}{\mu_0} d\ell$$

JCC(12) ≈ 1 の場合は各メッシュの電流の総和を計算

5) ANZN (安全係数の計算) - ENTRY BOMEG -

- 磁気軸の位置の計算
- 磁気軸を中心にプラズマ表面をNSに分割した各点の座標とポロイダル磁場の計算
- $\oint_{\psi_B} B_p d\ell$ の計算, $\langle B_p^2 \rangle$ の計算 → CALL FELI
- BOMEG RETURN -
- ψ のピーク値を10等分した各磁気面をNSに分割した各点の座標とポロイダル磁場の計算

- 各磁気面の q の計算

$$q \text{ の定義は } q(\psi) = T(\psi) \oint_{\psi} \frac{d\ell}{2\pi r^2 B_p}$$

- 6) OUT1 (ラインプリンタへの出力)
 - 各メッシュ点の ψ の出力
 - 電流密度, 圧力, ψ のプロファイルの出力
 - 平衡量の出力
- 7) OUT2 (ディスクF20, F30への出力)
 - プラズマ形状データ, メッシュデータ, ψ , p , j 等の出力
 - FORMATは20A4 (一部10A8)
- 8) OUTSCL (ディスクF40への出力)
 - スケーリングデータの出力
 - FORMAT 20A4
- 9) F01 (ADI反復式の係数の計算)
 - (ENTRY F02~F09, F11~F19)
 - r 方向ADI反復式の各項の係数と定数 F01~F09
 - z 方向ADI反復式の各項の係数と定数 F11~F19
(2.16), (2.17)式参照
- 10) FELI (プラズマ外周長, $d\ell$ の計算)
 - 磁気軸を中心にプラズマ外周をNSに分割した時の角度TX1からTX2までの周長ELPを計算する。
→CALL CIRMGX
- 11) CIRMGX, CIZMGX
 - 磁気軸を中心とする線分とプラズマ外周との交点の座標を求めるルーチン
- 12) CIRRA
 - 入力した座標点を通るプラズマ外周形状と相似形の図形の小半径 a に相当する長さを求めるルーチン
- 13) CIRZT
 - r 方向座標を入力し, プラズマ外周上の z 座標を求めるルーチン

A 2.2 EXEC

Fig. A.4にフローチャートを示す。FIBERの計算結果よりプラズマ電流のみによるポロイダル磁場を計算し, 全ポロイダル磁場から引くことによって外部平衡磁場を得ている。各サブルーチンの概要を以下に記す。

- 1) FTMAIN (メインルーチン)
 - データファイルF20よりの入力 (FIBERの出力ファイルF20)
 - インプットデータのLP出力
 - プラズマ電流のみによるポロイダル磁場 B_{r1} , B_{z1} の計算 (各メッシュのプラズマ電流

→円環電流による磁場) → CALL CELP

○全ポロイダル磁場 B_{r1} , B_{z1} の計算 (全ポロイダル磁束関数 ψ_1 より $rB_{r1} = -\partial\psi_1/\partial z$, $rB_{z1} = \partial\psi_1/\partial r$ によって計算) → CALL DIFLAS

○外部平衡磁場 B_{re} , B_{ze} の計算 (全ポロイダル磁場 B_{r1} , B_{z1} よりプラズマ電流のみによる磁場 B_{ri} , B_{zi} を引くことにより求める。)

○計算結果の出力

ラインプリンタ B_{re} , B_{ze} , B_{r1} , B_{z1} , B_{ri} , B_{zi} の各分布を出力 → CALL OUTMX

ディスク F 30 外部平衡磁場分布 B_{re} , B_{ze} を出力

ディスク F 40 OPTBVS の入力としてミッドプレーン上とプラズマ境界の平衡磁場を出力

2) CELP

○環状線電流の座標と電流値, 磁場を求める点の座標を入力し, B_r , B_z , ψ を計算するルーチン → CALL CELI

3) CELI

第1種, 第2種の完全楕円積分を計算するルーチン

4) OUTMX

二次元のマトリクスデータをLPに書き出すルーチン

A.2.3 SCAL

スケーリングの式は2.5節に示す通りである。また磁気軸上の安全係数 q_m を1.0にするためのプラズマ電流を求める場合は(3.1)式を用いる。入力データはFIBERの出力ファイル, F40とスケーリングする主半径, プラズマ電流, トロイダル磁場の値のみである。

A.2.4 OPTBVS

プラズマ断面上に平衡コイルの存在し得る線分を規定し, コイル個数, 電流の方向を与えて目的の平衡磁場分布を実現する最適のコイル配置, 電流を求める。Fig. A. 5にフローチャートを示す。詳しくはJAERI-M 6018を参照されたい。

A.2.5 PLTEQ

プロッター, COM, PTSLIB等への作図プログラムである。作図データの計算部分と作図ルーチンとを分けそれぞれPLTEQ1, PLTEQ2としてある。FIBERで得られた平衡解と共にOPTBVSで得られた平衡コイルの配置, 電流による外部磁場を用いた結果も図形出力する。フローチャートをFig. A. 6に示す。出力する図はプラズマ電流のみによるポロイダル磁気面, 外部平衡磁場の磁束分布, 全ポロイダル磁場の磁気面, プラズマ電流のみによるポロイダル磁場の等磁位面, 外部平衡磁場の等磁位面, 全ポロイダル磁場の等磁位面, プラズマ圧力分布, トロイダル電流密度分布, 全ポロイダル磁気面, ミッドプレーン上のプラズマ圧力, トロイダル電流密度, 磁束関数のプロファイルである。

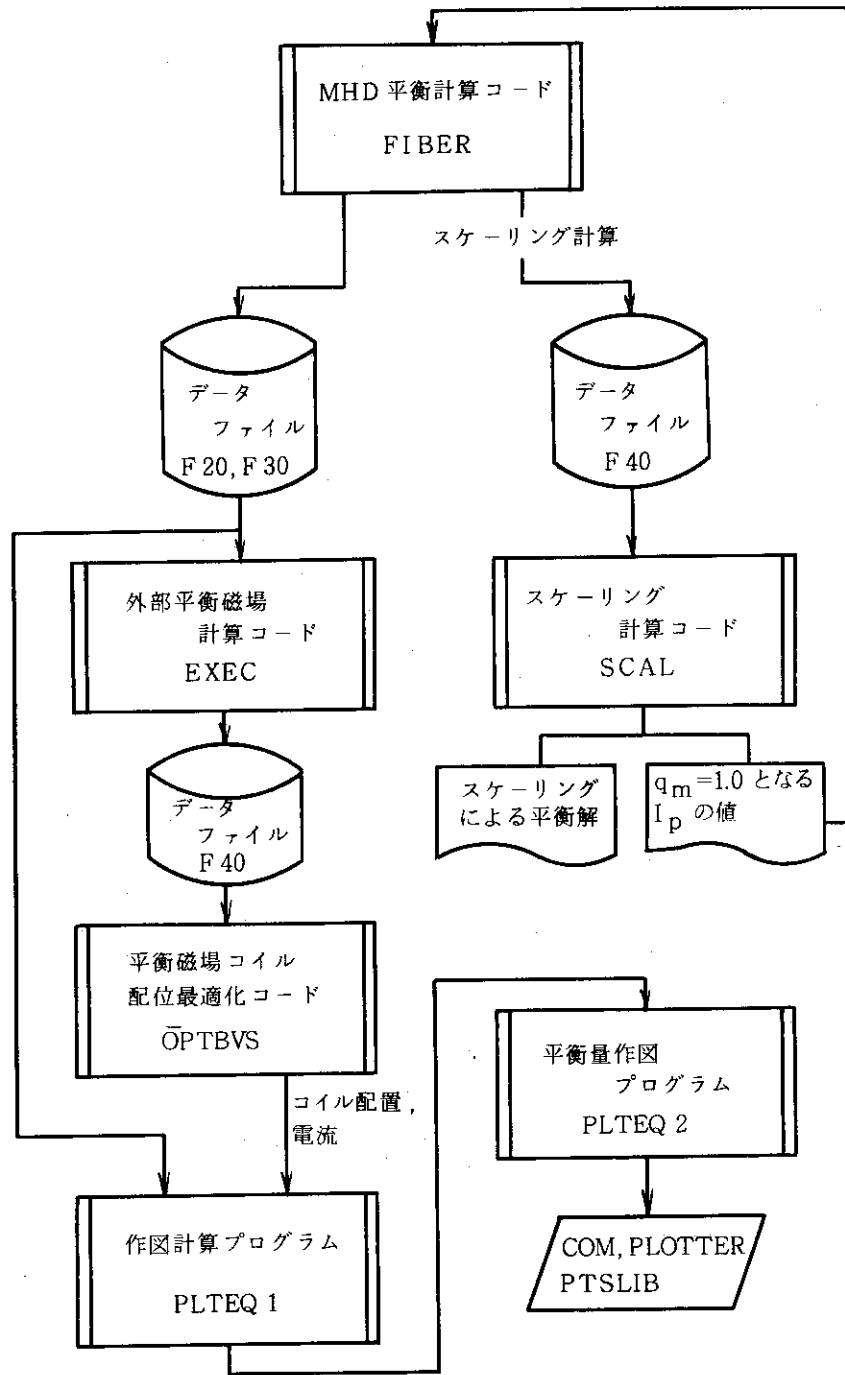


Fig. A. 1 MHD 平衡計算系の構成

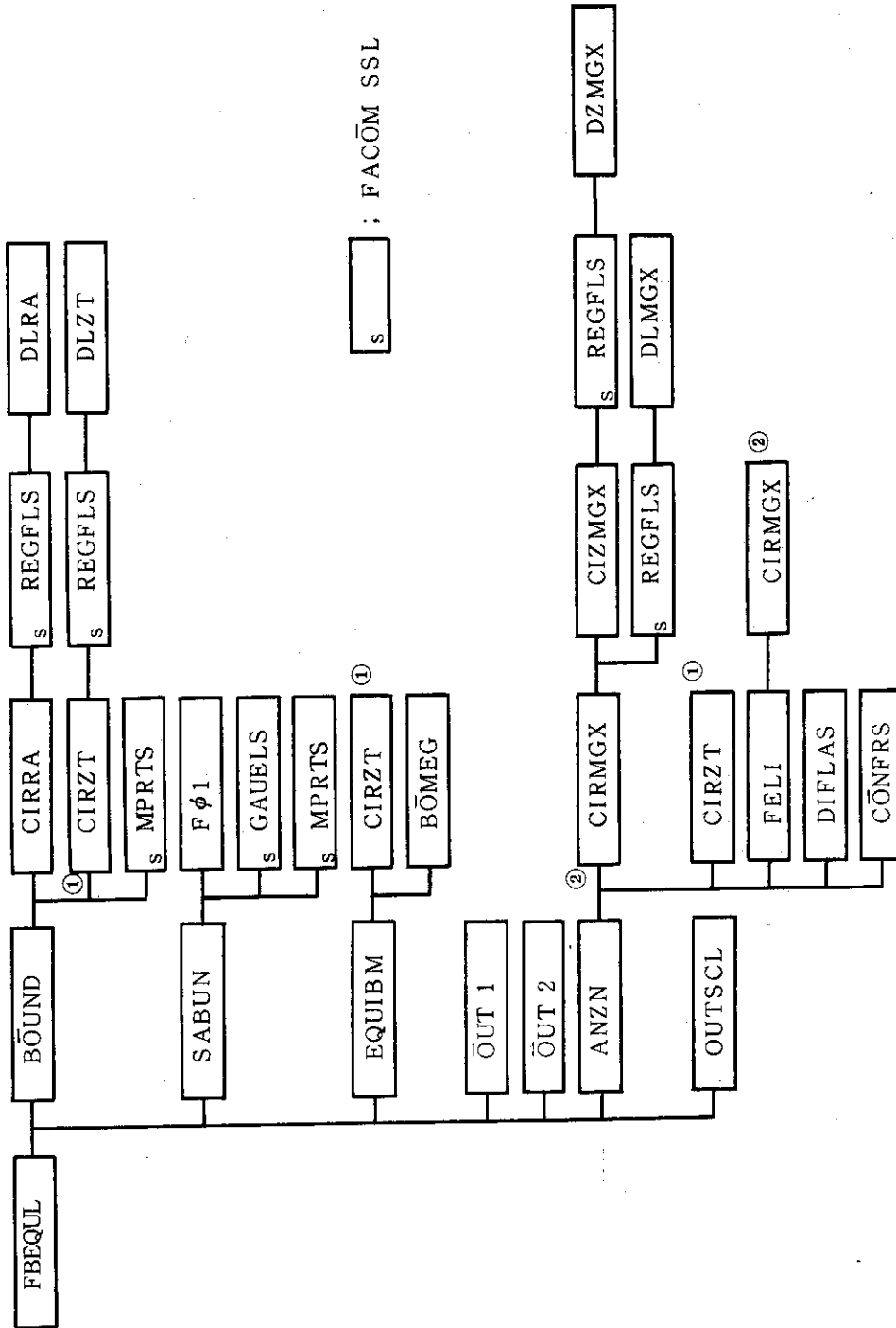


Fig. A. 2 FIBER Code のサブルーチンの構成

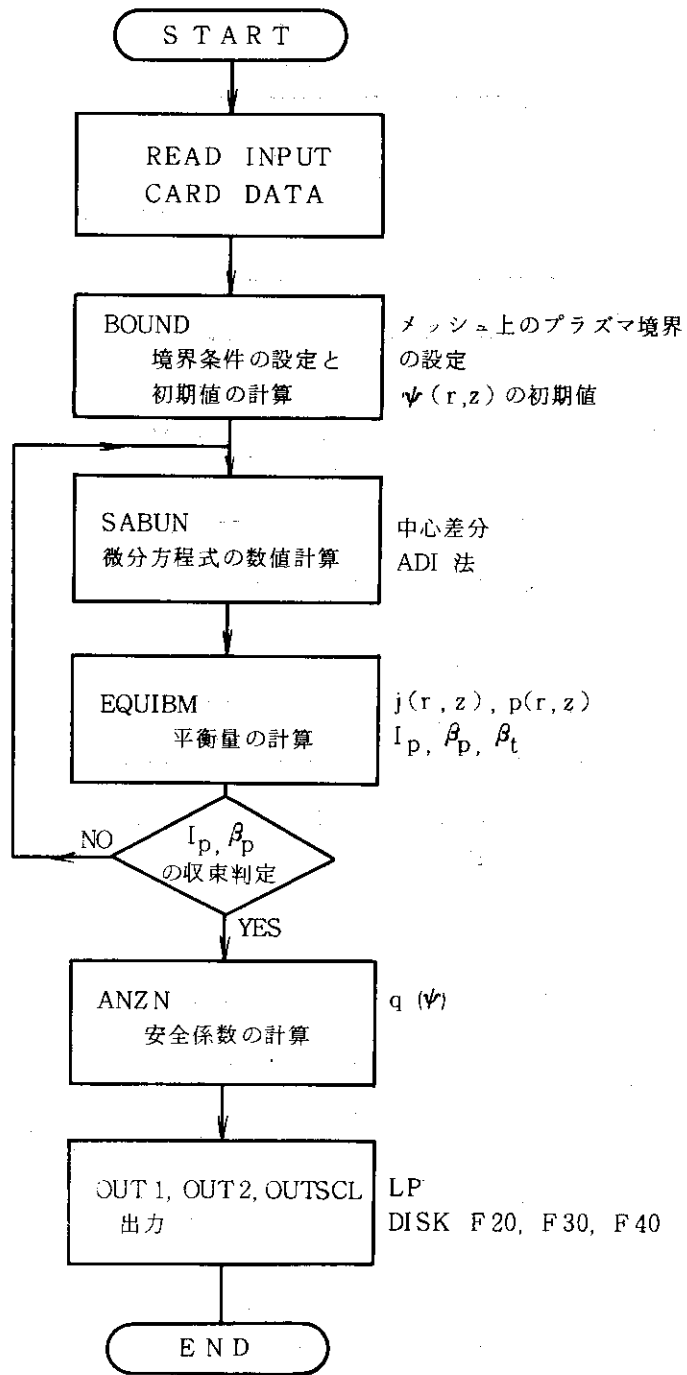


Fig. A. 3 FIBER Code のフローチャート

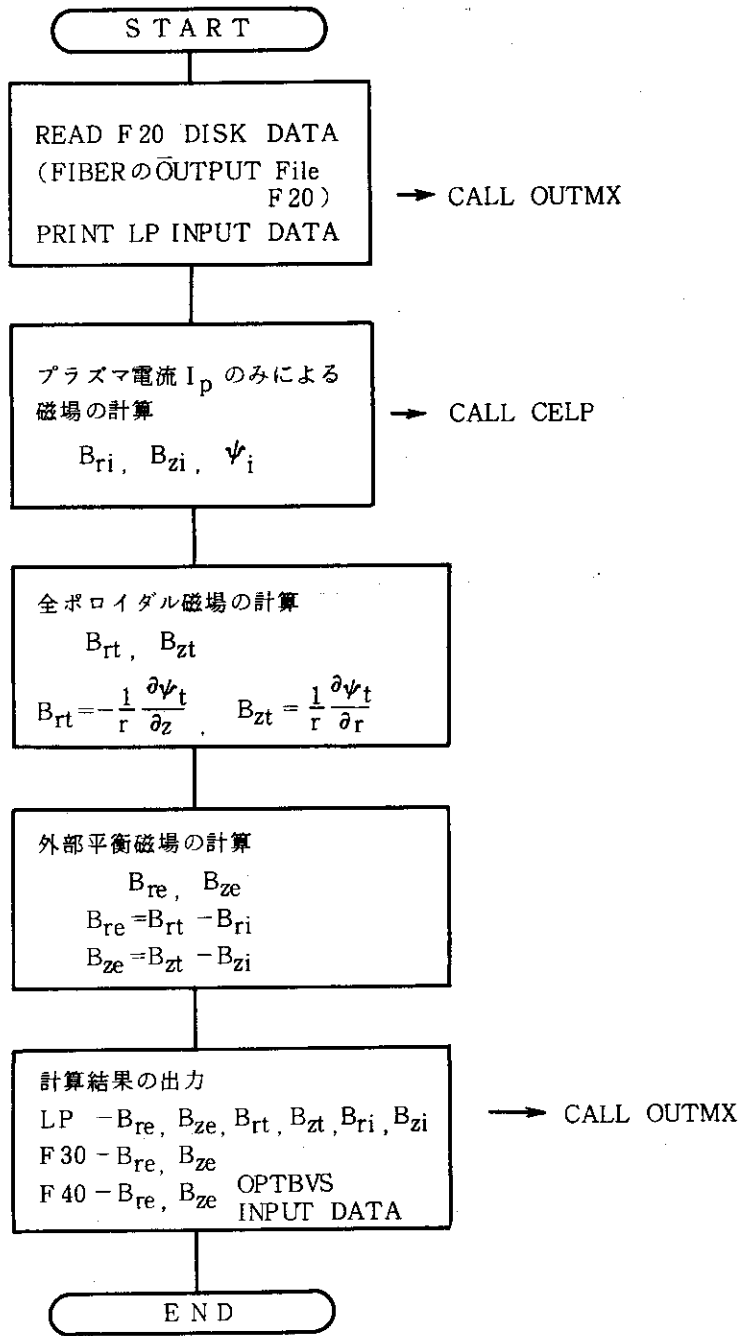


Fig. A. 4 EXEC Code のフローチャート

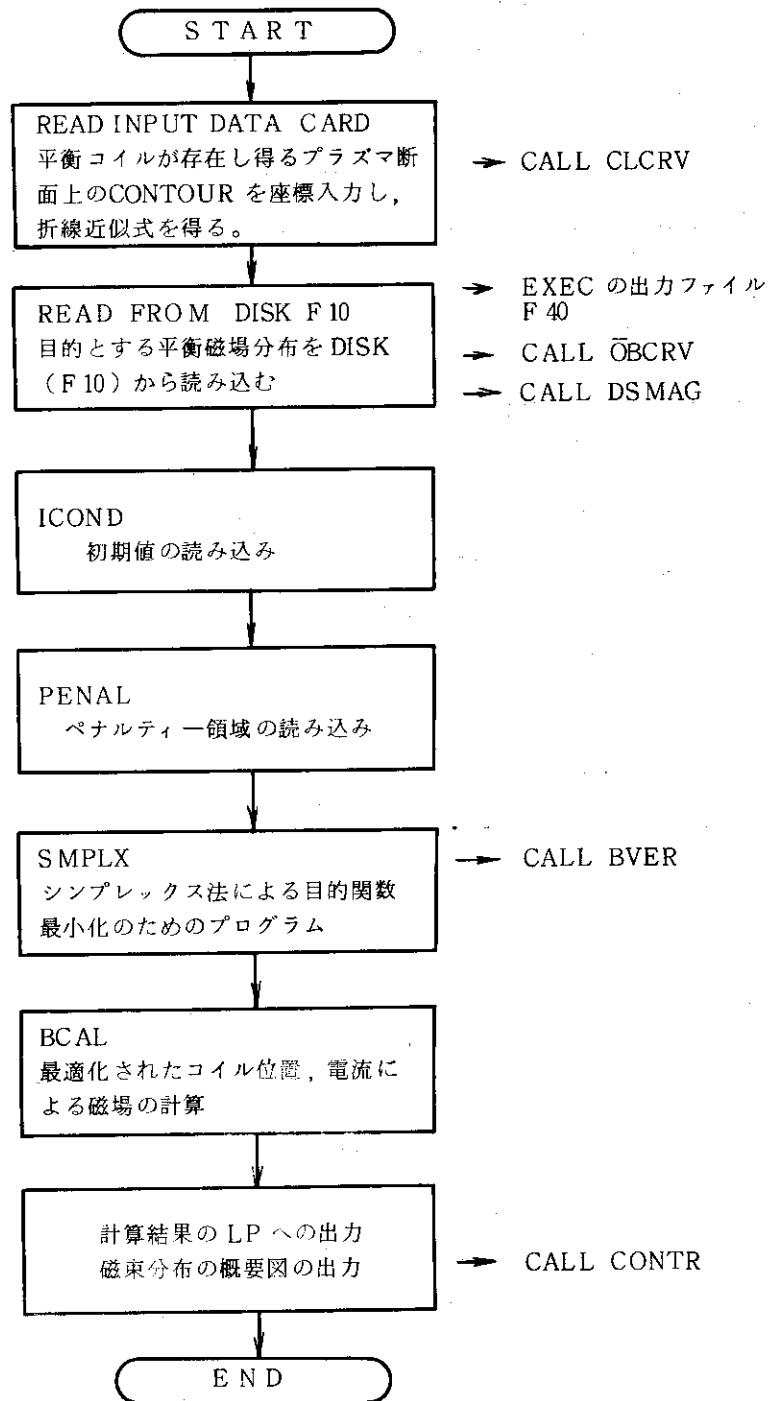


Fig. A. 5 $\bar{O}PTBVS$ Code のフローチャート

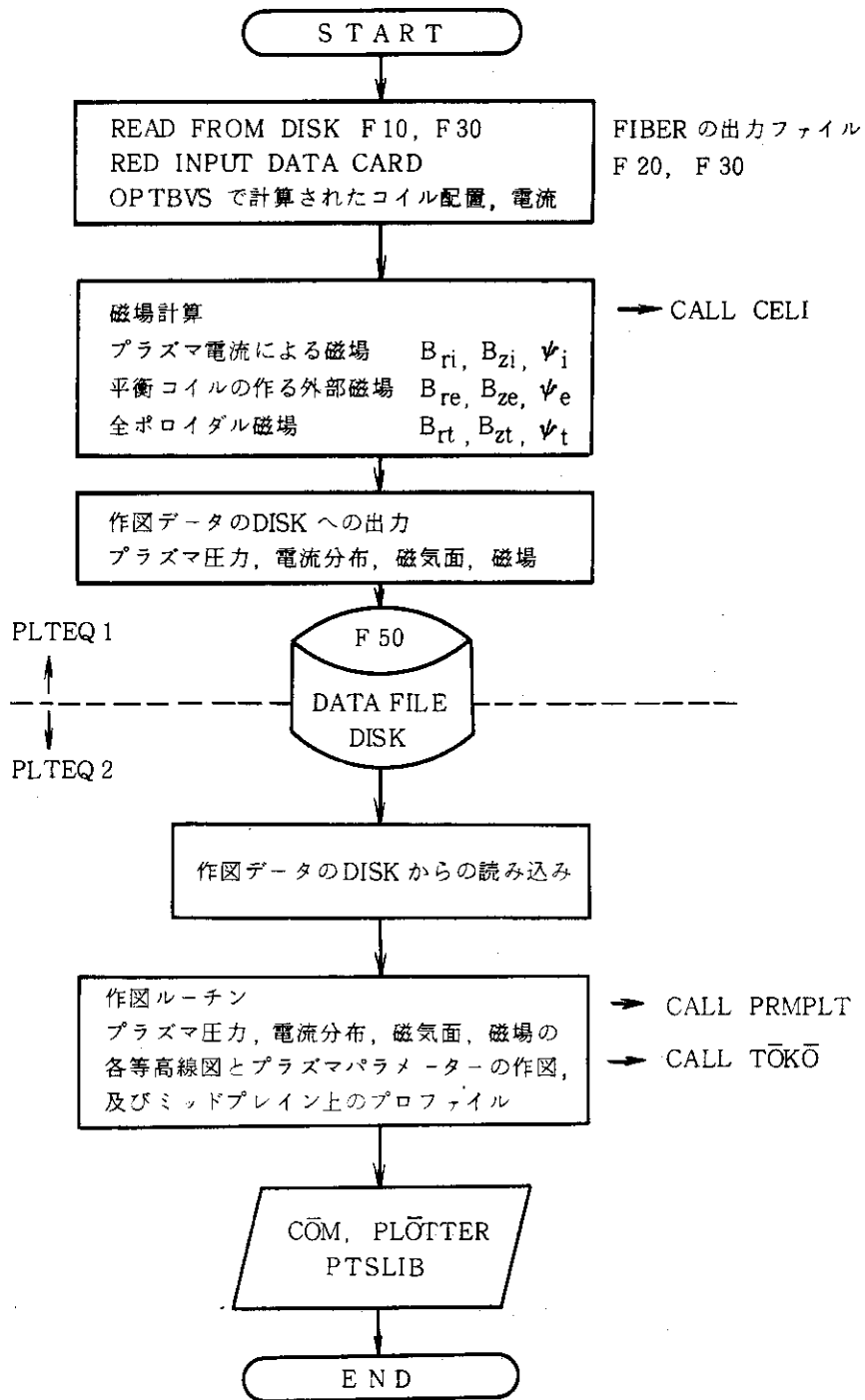


Fig. A. 6 PLTEQ Code のフローチャート

A 3 INPUT MANUAL

A.3.1 FIBER

1) 入力出力FILE

F 20 (DISK) 外部平衡磁場計算用データ

F 30 (DISK) 図形出力用データ

F 40 (DISK) スケーリング計算用データ

FCBパラメーター RCDSIZE = 90, BLKSIZE = 1800, TMOD = 8

2) INPUT DATA CARD

CARD No.1 JCC(I), I = 1, 18 18 I 4

JCC(1)..... = 1 で F 20, F 30 のファイルにデータ出力

JCC(2)..... = 1 で F 40 のファイルにデータ出力

JCC(5)..... ≈ 0 で F1, TETA1~TETA3, III, JJJ の初期値を PRINT

JCC(10)..... 計算打ち切り時間を入れる。単位は秒

JCC(11)..... = 1 で次の式により β_p を定義

$$\beta_p = 2 \mu_0 \bar{p} / \langle B_p^2 \rangle, B_p \text{ はプラズマ表面のポロイダル磁場}$$

 ≈ 1 で次の式により β_p を定義

$$\beta_p = 2 \mu_0 \bar{p} / B_a^2, B_a \text{ は } B_a = \frac{\mu_0 I_p}{2 \pi a}$$

JCC(12)..... = 1 で $I_p = \oint (B_p / \mu_0) dl$ で I_p を計算 ≈ 1 で $I_p = \sum j_{\theta} \cdot \Delta S$ で I_p を計算, j_{θ} はメッシュ点の電流密度 ΔS は 1 メッシュの面積

CARD No.2 NC I 4

NC..... = 1 を入力

CARD No.3 RM, RA, AK, AA, DL 6 E 12.5

RM.....主半径 (m)

RA.....プラズマ半径 (m)

AK.....楕円度

AA.....アスペクト比, AA = 0.0 の時 AA = RM/RA

AA ≈ 0.0 の時 RA = RM/AA

DL.....三角形度

* プラズマ形状の定義式は Fig. A. 7 で

$$r = RM + RA * \cos(\theta + DL * \sin(\theta))$$

$$z = RA * AK * \sin(\theta)$$

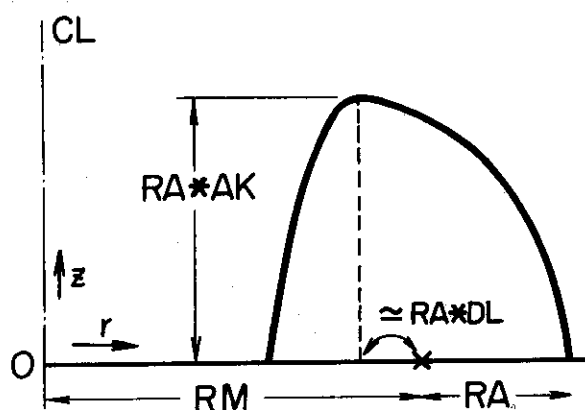


Fig. A.7

CARD No4 AIP0, BEP0, BTR, ALW, GA 6E12.5

AIP0 プラズマ電流(A)

BEP0 ポロイダルベータ

BTR トロイダル磁場(T)

ALW 差分計算 (ADI法) の収束パラメーター, 0.3~1.0程度 (計算条件による)。

GA 収束加速パラメーター (0.45)

CARD No5 Z, VB, ALMP, BEP1, V 6E12.5

Z プラズマ圧力分布の巾数, (0.1~0.9) $p = p_0 \psi^{1+z}$ で圧力を定義

VB β_p を ITERATION によって収束させる時のパラメータ, VB=0.0 入力の時 VB=1.0 となる。

ALMP プラズマ電流分布の圧力項にかかる係数の初期値 (I_p を収束させるため ITERATION を行う)

ALMP = 0.0 入力の時プログラムが適当な初期値を計算して入力する。

BEP1 β_p の ITERATION の際の初期値

BEP1 = 0.0 入力の時プログラムが適当な初期値を計算して入力する。

V トロイダル磁束分布の幅数, $I^2(\psi) = I_0 + I_1 \psi^{1+v}$ で定義

V = 0.0 入力の時 V = Z となる。

CARD No6 HAN, EPS, SHU, FIO, FIB 6E12.5

HAN ADI法の収束判定値 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度

EPS ゼロ判定値 (GAUELS) $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 程度

SHU I_p, β_p の ITERATION の収束判定値 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 程度

FIO ポロイダル磁束関数 ψ_{max} の初期値

FIO = 0.0 入力の時プログラムが適当な初期値を計算して入力する。

FIB プラズマ境界上の ψ の値, FIB = 0.0

CARD No7 NM, NS 18I4

NM r 方向のメッシュ分割数, 偶数を入力

NSポロイダル磁場を計算する際のポロイダル角分割数
 CARD No8 NC 18 I 4
 NC = 999 を入力

A.3.2 EXEC

1) 入出力FILE

F 20 (DISK) FIBERの出力FILE F 20
 F 30 (DISK) 外部平衡磁場分布
 F 40 (DISK) 平衡磁場コイル配置設計用データ
 FCB パラメーター RCDSIZE=90, BLKSIZE=1800,
 TMOD = 8

2) INPUT DATA CARD 不必要

A.3.3 SCAL

1) 入出力FILE

F 40 (DISK) FIBERの出力FILE F 40

2) INPUT DATA CARD

CARD No1 RM1, AIPL1, BTR1 6 E 12.5
 RM1 スケーリングにより求める平衡解の主半径 (m)
 AIPL1 ... スケーリングにより求める平衡解のプラズマ電流 (A)
 AIPL1=0.0入力の時磁気軸上の安全係数 $q_m = 1.0$ になる様な平衡解
 とその時のプラズマ電流をスケールリングする。
 BTR1 スケーリングにより求める平衡解のトロイダル磁場 (T)

A.3.4 OPTBVS

1) 入出力FILE

F 10 (DISK) EXECの出力FILE F 40

2) INPUT DATA CARD

CARD No1 IRED, IWRT, NDSK1, NDSK2, LWRD 10 I 6
 IRED $\neq 0$ の時DISK (F 20, F 30) よりデータを読み込む (リスタートの
 場合)
 IWRT 計算打ち切り時間 (分)
 打ち切る場合リスタート用FILE (F 20, F 30) にデータを書き出す。
 = 0の場合計算打ち切りは行わない。
 NDSK1 ... = 0 未使用
 NDSK2 ... = 0 未使用
 LWRD = 0 未使用
 CARD No2 HEAD(I), I = 1, 10 10 A 8

タイトルカード

* リスタートの場合以下のカードは不必要

CARD No3 N, IMAX, INIT, IRIT, IPSKP, IPEN 10 I 6

N コイル数 (NCOIL) + 1 (上半面の数)

IMAX ITERATIONの打ち切り回数 (801~1001)

INIT シンプレックス法の初期条件のタイプを判別する, 通常は0

IRIT シンプレックス法の計算でLP出力する変数の制御

= 0 何も出力しない

= 1 主要変数のみPRINT

= 2 全変数をPRINT

IPSKP ... ITERATIONのIPSKP回毎に上記をPRINTする, IPSKP=0
の時IPSKP=1となる。

IPEN ペナルティ領域数の指定

CONTUR上のペナルティ領域数をMPとするとIPEN=NCOIL-1
+MP

CARD No4 EPSF, ALP, BET, GAM, PENMLT 6 E 12.5

EPSF ITERATIONの収束判定値

= 0.0の時EPSF=1.0E-8

ALP シンプレックス法の反射係数

= 0.0の時ALP=1.0

BET シンプレックス法の収縮係数

= 0.0の時BET=0.5

GAM シンプレックス法の膨脹係数

= 0.0の時GAM=2.0

PENMLT... ペナルティ一項の増倍係数

= 0.0の時PENMLT=100.0

CARD No5 ITYPE, NP, EPSLN 2 I 6, E 12.5

ITYPE ... コイルの存在し得るCONTOURの定義法

= 0 楕円の式でCONTOURを与える。

= 1 座標点列を与え線形近似する。

NP ITYPE=1の場合与える座標点の数

EPSLN ... 近似の際の判定値

= 0.0の時EPSLN=1.0E-8

CARD No6 XP(I), I=1, NP 6 E 12.5

XP コイルCONTOURを与える座標点のr座標を順にNP個入力する。

CARD No7 YP(I), I=1, NP 6 E 12.5

YP コイルCONTOURを与える座標点のZ座標を順にNP個入力する。

* ITYPE=0の場合はCARD No6, 7の代わりに次のカードを入力する。

CARD No* R0, RS, REL 6 E 12.5

R0 楕円CONTOURの大半径 (CONTOURの中心のr座標) (m)

RS CONTOURの小半径 (円のr方向半径) (m)

REL 楕円度 (z方向半径 / r方向半径)

CARD No8 CURR(I), I=1, NCOIL 6 E 12.5

CURR 各コイルの電流値 (方向も土で示す) (A)

*電流値そのものはプログラムが最適化していくが各コイルの電流比, 方向はここで与える。

CARD No9 JTYPE, JMAX, JWEIT, CWR 3 I 6, E 12.5

JTYPE ... 平衡磁場の与え方を決める。

= 0, or 1の時楕円上の点, もしくはミッドプレーン上で平衡磁場を与える。

= 2の時DISK (F10) より平衡磁場を読み込む。

*この一連の計算ではDISK (F10)より平衡磁場を読み込むことを前提としているのでJTYPE=2とする。(以後もJTYPE=0, or 1の場合は省く)

JMAX = 0 (DISKより読み込むので省く)

JWEIT ... = 0

CWR 平衡磁場のr方向成分Bre にかける重み

CARD No10 XL(I), I=1, N 6 E 12.5

XL(1)~XL(NCOIL) コイルの初期位置

位置はコイルCONTOURに内接する円の周上にCONTOUR上の点よりz方向に下した点の中心よりの角度(ラジアン)で与える。

XL(N) コイル電流の重みの初期値

XL(N)*CURR(I)が実際のコイル電流となる。

CARD No11 HHH(I), I=1, N 6 E 12.5

HHH シンプレックス法におけるエッジの長さの初期値 (HHH(I)=0.1程度)

CARD No12 PPP(I), N+1 6 E 12.5

ペナルティ領域の定義; PPS=PPP(4)*XL(4)+PPP(2)*XL(2)+.....+PPP(N)*

XL(N)としてPPS+PPP(N+1), GE. 0.0 となる様に最適化を進めて行く。例えば

1番目のコイルの位置を0.5rad以下には出来ない場合, PPP(1)=1.0, PPP(2)~

PPP(N)=0.0, PPP(N+1)=0.5とすればXL(4)は0.5以下にはならない。

*上記カードをペナルティ領域の数に応じて(IPEN-NCOIL+1)組入力する。

A.3.5 PLTEQ1

1) 入出力FILE

F10 (DISK) FIBERの出力FILE F20

F30 (DISK) FIBERの出力FILE F30

F 50 (DISK) 作図用データFILE

FCBパラメーター RCDSIZE = 90, BLKSIZE = 1800, TMOD = 8

2) INPUT DATA CARD

CARD No1 NPZ 12 I 6

NPZ ……平衡磁場コイルのコイル数 (上半面)

CARD No2 CURZ(I), I = 1, NPZ 6 E 12.5

CURZ ……各コイルの電流比

CARD No3 CMZ 6 E 12.5

CMZ ……単位電流比に対する電流 (CMZ * CURZ(I)が各コイルの電流(A)となる)

CARD No4 RZ(I), ZZ(I), I = 1, NPZ 6 E 12.5

RZ ……各コイル位置のr座標 (m)

ZZ ……各コイル位置のz座標 (m)

A.3.6 PLTEQ2

1) 入出力FILE

F 50 (DISK) PLTEQ1の出力FILE F 50

COM or PLOTTER or PTSLIB用の制御文が必要

2) INPUT DATA CARD

CARD No1 XXP, XK 6 E 12.5

XXP ……図の横方向長さ (mm)

XK ……図の作画を一部省略する場合1.0を入力する, 他は0.0

CARD No2 KK 12 I 6

KK ……XK = 1.0とした場合次に描く図のNoを入力する, XK = 0.0の場合は

CARD No2は不要である。

CARD No3 ZMIN, DZ, ZMAX 6 E 12.5

ZMIN ……等高線の最低等高線の値

DZ ……1等高線の増分値

ZMAX ……等高線図の最高等高線の値

* XK = 0.0の場合CARD No1に続いてCARD No3を対応する図に対して6枚入力する。

順序は次の通り。

- ① プラズマ電流のみによる磁束
- ② 外部平衡磁場の磁束
- ③ 全ポロイダル磁気面
- ④ プラズマ電流のみによる磁場強度
- ⑤ 外部平衡磁場の強度
- ⑥ 全ポロイダル磁場の強度

* XK = 1.0の場合描きたい図のNoをKKに入力し, CARD No3を続けて1組とする, 最後はKK ≥ 7を入力して次段に進む。

CARD No.4 KK 12 I 6

CARD No.5 ZMIN, DZ, ZMAX 6 E 125

* CARD No.2, 3 と同様である, $XK=0.0$ の場合はCARD No.4 を省略 (図に対応して
CARD No.5 を3枚入力する。図の順序Noは次の通り。)

① プラズマ圧力

② プラズマ電流密度

③ 全ポロイダル磁束

◦ $XK=1.0$ の場合描きたい図に対応するCARD No.4 と5 の組を入力し最後に $KK \geq 4$ を
入力して次段に進む。

* 入力は不要であるがこの後次の三枚の図を描いてプログラムは終了する。

① ミッドプレーン上のプラズマ圧力分布

② ミッドプレーン上のプラズマ電流密度分布

③ ミッドプレーン上のポロイダル磁束関数分布