

JAERI-Data/Code
95-010



DPS (Deformable Plasma Simulation) コードの開発

1995年8月

仙田郁夫^{*1}・莊司昭朗・西尾 敏・常松俊秀・西野 徹^{*2}・藤枝浩文^{*3}

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 株原子力資料サービス

DPS(Deformable Plasma Simulation)コードの開発

日本原子力研究所那珂研究所 I T E R 開発室

仙田 郁夫^{*1}・莊司 昭朗・西尾 敏・常松 俊秀
西野 徹^{*2}・藤枝 浩文^{*3}

(1995年7月3日受理)

プラズマ形状の変化を考慮した、プラズマ位置・形状制御シミュレーションコードDPS (Deformable Plasma Simulation) Codeを開発した。DPSコードは、プラズマ形状などの変化の効果が無視できない、マイナーディスラプション発生時等のプラズマ制御を模擬することを主たる目的とする。本コードでは、プラズマ位置をフィードバック制御する間の、プラズマ形状の時間的変化を追跡し、これらの変化を考慮してプラズマの運動を解く。

本報告書は、プラズマ運動の記述方法及びコードの構成について解説と、本コードの使用手引きからなる。また、計算結果の例として、ITER工学設計活動に於いて行った、シミュレーション結果を示す。本コードには幾つかの異なるバージョンが存在する。付録に於いて、セパラトリックスの時間発展を求めるバージョンと制御で使用される有効電力を求めるバージョンについて紹介する。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

*1 株東芝より出向中

*2 株カナザワコンピュータサービス

*3 株原子力資料サービス

Development of DPS(Deformable Plasma Simulation)Code

Ikuo SENDA^{*1}, Teruaki SHOJI, Satoshi NISHIO, Toshihide TSUNEMATSU
Toru NISHINO^{*2} and Hirobumi FUJIEDA^{*3}

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

(Received July 3, 1995)

Deformable plasma simulation (DPS) code is developed. DPS code solves a motion of a plasma during feedback control taking into account the deformation of plasma shape. DPS code is developed to study the control system of the plasma position and shape in minor disruptions in which deformation of plasma is not negligible.

In this report, the mathematical formulation and the structure of DPS code are presented. As examples of simulations, the results of analysis in the engineering activity of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) are reported. In appendix, some modified versions of DPS code are presented.

Keywords: Plasma, Control, Eddy Current, Deformable, Equilibrium Computation

*1 On loan from Toshiba Corporation

*2 Kanazawa Computer Service

*3 Atomic Energy General Service Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. モデルの解説	3
2.1 概 要	3
2.2 プラズマの運動方程式	3
2.3 プラズマ平衡解析	8
2.4 制御シミュレーションの方法	9
3. 使用手引き及び計算例	10
3.1 入力データの解説	10
3.2 計算結果及び出力データの例	16
4. まとめ	17
参考文献	18
付 錄	29

Contents

1. Introduction	1
2. The Method of the Analysis	3
2.1 Overview	3
2.1 Equation of the Plasma Motion	3
2.3 Equilibrium Computation of Plasma	8
2.4 Feedback Control Simulation	9
3. Manual of the Code and Examples of Computations	10
3.1 Input Data	10
3.2 Examples of Output Data	16
4. Summary	17
Reference	18
Appendix	29

1. はじめに

プラズマ位置・形状制御はプラズマの安定放電には欠かすことができない。

また炉設計に於いては、プラズマ制御の要請により系の電源容量に対する条件が出てくる。さらに、超伝導コイルを用いる炉設計では、プラズマ制御時に低温部に発生するジュール熱を除熱するのに十分な冷却施設が必要になるため、プラズマ位置・形状制御は冷却施設設計の基礎データを与える。その他にも、第一壁への熱負荷や高周波加熱装置とプラズマとの結合の維持など、プラズマ位置・形状制御は炉設計の多くの分野と深いつながりを持つ。

すでに、炉設計用には多くのプラズマ制御シミュレーションコードが存在する。線形モデルを用いたシミュレーションコードなどは、多くのパラメータについて検討しなくてはならない炉設計に適しており、ITERの設計作業でも利用されている [1, 2]。しかしながら、線形モデルではプラズマの形状が大きく変化した場合には、その近似が悪くなり、その適用範囲が限定される。一方、マイナーディスラプションと呼ばれる、数十%の熱エネルギー損失を伴う擾乱が発生した場合では、放電を維持したまま再び所定のプラズマに戻してやることが望まれる。マイナーディスラプション等では、プラズマが大きく水平方向に移動し、プラズマの形状等が変化することが考えられ、線形モデルを適用することが適當ではなく、プラズマ形状に変化を許した非線形なモデルを用いる必要がある。プラズマ形状の時間発展を追跡できる非線形シミュレーションコードは既に幾つか存在し、実験の解析等に利用されている。アメリカで開発された、TSC (Tokamak Simulation Code) は広く利用されている [3]。

各種コードで取り扱える変数と計算の適用範囲を表1にまとめる。線形モデルでは、プラズマの平衡配位からの変化が小さいとして、平衡配位で求めたプラズマ運動方程式を解く。プラズマを剛体として扱うモデルでは、出力としてプラズマ中心、プラズマ電流の変化などが得られる [1]。また、プラズマ形状変化を考慮したモデル、可変形モデル、では線形近似でセパラトリックス等の時間発展を求めることができる [2]。一方、非線形モデルではプラズマの変化を考慮してプラズマの運動を解くためその適用範囲が広い。また、プラズマ中心ばかりではなく、セパラトリックス等の多くのプラズマパラメータの時間変化の情報が得られる。

既存の非線形コードは流体の複雑な現象を解いており、長い計算時間を要する。このため、これらのコードは、多くのシミュレーションパラメータについて計算・検討しなくてはならない炉設計の作業には必ずしも適しておらず、短時間で計算のできるコードの開発が望まれていた。そこで、プラズマの形状の変化が無視できないような擾乱が加わった場合に、プラズマの形状の時間発展を追うことのできる非線形プラズマ制御シミュレーションコード、DPS(Deformable Plasma

Simulation)コード、を開発した。本コードは、周辺プラズマを考慮しないことや輸送現象を扱わない等の簡略化を行っているため、計算時間を短く抑えることができる。例えば、3節で示すようなITER.EDAに於けるマイナーディスラプション時の制御シミュレーションであれば、IBM ワークステーション RS6000-590を用いて数時間程度のCPU時間で計算することができる。また、電源や制御系の多彩な模擬ができるように構成されている。しかしながら、先に述べた簡略化から来る制限もあり、DPSコードはディスラプションなど、周辺プラズマの影響や輸送現象が重要になる事象のシミュレーションには適さない。

次節では、プラズマの時間発展を求めるモデルを解説する。また、3節では、コードの使用解説及び出力の例を示す。付録では、セパラトリックスの時間変化を求めることのできるバージョンと、コイル電圧・電力の時間微分に制限を加えた計算が可能なバージョンについての解説と計算例を紹介する。

表1 プラズマシミュレーションモデルの分類

種類	線形モデル		非線形モデル
	剛体モデル	可変形モデル	可変形モデル
変数	プラズマ中心 及び電流	プラズマ中心、 プラズマ電流及び セパラトリックス等	プラズマ中心、 プラズマ電流及び セパラトリックス等
適用範囲	平衡からの微小変化		大変位でも可能*

* DPSコードは、ハロー電流が無視できる等の近似の範囲内で適用できる。

2. モデルの解説

2. 1 概要

ここで解説する DPS(Deformable Plasma Simulation) Code は、線形化されたプラズマ時間発展とグラドーシャフラノフ方程式を解く平衡計算の組み合わせである。

図 2-1 に計算のフローチャートを示す。 計算の概略は以下の通りである。
まず、ある平衡配位より出発し、その平衡からの変化が小さいとして線形化した運動方程式の係数を求める。 線形化した運動方程式を用いて、プラズマの時間発展を追跡し、プラズマの電流中心がある定められた値より大きくずれたか、またはある時間より長く時間が経過したならば、時間発展を中止する。 その時間発展を中止した時刻で、コイル電流及び構造物に誘起される渦電流の作る磁束を考慮した平衡計算をする。 平衡は、ヌル点を通るセパラトリックスまたは第一壁とプラズマが接する磁気面を境界として、非線形であるグラドーシャフラノフ方程式を解いて求める。 この新たに求まったプラズマ配位について、線形化された運動方程式の係数を求め、再び時間発展を追跡する。 この様な行程を繰り返し行うことにより、変形しながら時間発展するプラズマの様子を追うことができる。

プラズマの運動はトロイダル対称性を仮定して、ポロイダル断面に於けるプラズマの二次元的な分布の時間発展を追う。 また、トカマクに於けるプラズマ運動の解析では、構造物に誘起される渦電流の評価が大きな比重を占める。 PDS コードでは、有限要素法を用いた、固有値解析法を用いる [4]。 このため、設計に忠実な真空容器やブランケットの三次元的な形状をモデル化することができる。 この渦電流解析の解説については、多くの文献が存在するため、本報告書では詳細の解説を省くことにする。

プラズマ制御を模擬するために、サンプリング時間、計測等に起因する遅れ時間といった幾つかのパラメータを本コードは持つ。 制御方法は、PID制御法により、プラズマ電流中心をフィードバック変数としコイル電圧を制御する方法を採用した。 また、本コードにはプラズマ境界と内壁との距離を求めるバージョンもあり、プラズマ電流中心のほかにプラズマ-内壁間のギャップをフィードバックの変数にすることも可能である。

2. 2 プラズマの運動方程式

プラズマのポロイダル断面での二次元的な運動は、プラズマ領域のポロイダル磁場とプラズマ電流トロイダル成分の結合により生ずる電磁力によりプラズマが運動するとして記述する。 プラズマはその質量により決まるアルフェン時間を特徴時間とする運動モードを持つのであるが、真空容器など構造物のプラズマ位置安

定化効果のために、その運動の特徴時間は構造物に誘起される渦電流の時定数程度に遅くなる。このため、以下の解説では、プラズマの慣性項を無視した近似の場合について述べる。プラズマ慣性項の効果を入れた場合についても解析を行っており、それに依れば慣性項はアルフベニン時間程度の周期を持つ微小振動をプラズマの運動に加えるのみで、構造物の渦電流によるプラズマ位置安定化効果が利いていいる限り、大きな影響を与えないことがわかっている。

ある時刻 t_0 に於けるプラズマ配位からのプラズマ電流中心のずれを $(\delta Z_p, \delta R_p)$ で表わすと、プラズマの運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_p \ddot{\delta Z}_p &= - \int dr dz j_{p(r,z)} 2\pi r (B_r^C(r,z) + B_r^E(r,z)) \\ M_p \ddot{\delta R}_p &= \frac{1}{2} C_F \mu_0 I_p^2 \left\{ \ln \frac{8R_p}{a_p} + \beta_p + \frac{1}{2} (\ell_i - 3) \right\} \\ &\quad + \int dr dz j_{p(r,z)} 2\pi r (B_z^C(r,z) + B_z^E(r,z)) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 M_p はプラズマの質量、 β_p, ℓ_i はポロイダルベータ値及び内部インダクタンスである。また、 B^C, B^E はコイル及び渦電流の作るポロイダル磁場、 a_p, R_p はプラズマの小半径及び大半径である。係数 C_F は、シャフラノフ項の係数であり、平衡時の水平方向の力のバランスで決まる。通常は 1 程度の値をとる。プラズマ電流分布密度 $j_{p(r,z)}$ は、各メッシュ点で定義され、全プラズマ電流 I_p で規格化される。

$$I_p = \iint dr dz j_{p(r,z)} \equiv \sum_{i,j} \delta R \delta Z j_{p(i,j)}$$

ただし、 $\delta R, \delta Z$ はメッシュの大きさである。

式(1)をある時刻 t_0 に於けるプラズマ平衡配位に対する微小な変化について線形化し、慣性項を無視することにより微分方程式を得る。

$$\begin{aligned} &2\pi B_z n \delta \dot{Z}_p - 2\pi B_z k \delta \dot{R}_p + A_{1,3} \left(\frac{\delta \dot{I}_p}{I_p} \right) \\ &+ \sum_j^{coil} I_p \partial_Z M_{p,j} \left(\frac{\delta \dot{I}_j}{I_p} \right) + \sum_\alpha^{eddy} I_p \partial_Z G_{p,\alpha} \left(\frac{\delta \dot{X}_\alpha}{I_p} \right) = 2\pi R_p \dot{B}_{R,d} - \partial_C F_Z \frac{\delta \dot{C}}{I_p} \\ &- 2\pi B_z k \delta \dot{Z}_p + A_{2,2} \delta \dot{R}_p + A_{2,3} \left(\frac{\delta \dot{I}_p}{I_p} \right) + \sum_j^{coil} I_p \partial_R M_{p,j} \left(\frac{\delta \dot{I}_j}{I_p} \right) + \sum_\alpha^{eddy} I_p \partial_R G_{p,\alpha} \left(\frac{\delta \dot{X}_\alpha}{I_p} \right) \\ &= -\frac{1}{2} \mu_0 I_p C_F C_\beta \Delta \dot{P} - 2\pi R_p \dot{B}_{Z,d} - \left[\frac{1}{4} C_F \mu_0 I_p^2 \partial_C \ell_i + \partial_C F_R \right] \frac{\delta \dot{C}}{I_p} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $G_{P,\alpha}$ は次式で定義されるプラズマと渦電流固有モードとの磁気結合係数である。

$$G_{P,\alpha} = \frac{1}{I_p} \iint dr dz j_{P(r,z)} G_{(r,z),\alpha}$$

係数 $G_{(r,z),\alpha}$ は、 α 一番目の渦電流モードと (r,z) の位置あるトロイダル対称な線電流との相互インダクタンスである。また、 δC は、後で解説するプラズマ電流分布のピーキングの係数である。式(2)で次の定義を用いた。

$$\begin{aligned} A_{1,3} &= \sum_j^{coil} \partial_z M_{P,j} I_j + \sum_\alpha^{eddy} \partial_z G_{P,\alpha} X_\alpha \\ A_{2,2} &= \frac{1}{2} C_F \mu_0 I_p \left(\frac{1}{2} - \frac{7}{3} C_\beta (1 + \Delta P) \right) \frac{1}{R_p} + 2\pi B_Z (1 - n) \\ A_{2,3} &= I_p C_F \mu_0 \left(\ln(8R_p/a_p) + \ell_i/2 - 3/2 \right) + \sum_j^{coil} \partial_R M_{P,j} I_j + \sum_\alpha^{eddy} \partial_R G_{P,\alpha} X_\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

プラズマの平衡配位で定まる定数、 B_Z , n , k を次式で定義する。

$$\begin{aligned} B_Z &= \frac{1}{I_p} \int dr dz j_{P,(r,z)} B_{Z,(r,z)} \quad , \\ n &= -\frac{1}{I_p B_Z} \int dr dz r j_{P,(r,z)} \partial_R B_{Z,(r,z)} \quad , \\ k &= -\frac{1}{I_p B_Z} \int dr dz r j_{P,(r,z)} \partial_z B_{Z,(r,z)} \end{aligned} \quad (4)$$

プラズマのポロイダルベータ値の変化を、断熱近似を用いて、

$$\beta_p(t) \approx C_\beta (1 + \Delta P) \left(1 - 2 \frac{\delta I_p}{I_p} - \frac{7}{3} \frac{\delta R_p}{R_p} \right)$$

で与える。係数 C_β は、平衡時のポロイダルベータ値そのものであり、 ΔP は失われた熱エネルギー割合を示す。次節で述べるように、プラズマ平衡は、プラズマ電流分布を磁束関数の関数として、次の形を仮定して求める。

$$j_p(\tilde{\psi}) = r P_0 \left[C_p + \left\{ 1 - (1 - \tilde{\psi})^{C_1} \right\}^{C_2} \right] + \frac{1}{\mu_0 r} F_0^2 \left[C_F + \left\{ 1 - (1 - \tilde{\psi})^{C_3} \right\}^{C_4} \right] \quad (5)$$

$$\tilde{\psi} = \frac{\psi - \psi_{sep}}{\psi_{max} - \psi_{sep}}$$

ここで、 ψ_{sep} 、 ψ_{max} はセパラトリックス及び磁気軸での磁束関数である。平衡計

算では、 $C1=C3=1, C2=C4=C$ の値を使う。このため、電流分布は定数 C により変えることができる。式(2)の中で、電流分布の変化に関連した量で、 $\partial_C F_Z$ 、 $\partial_C F_R$ は次の式で与えられる。

$$\partial_C F_Z = - \int dr dz 2\pi r \partial_c j_{P,(r,z)} B_{R,(r,z)}$$

$$\partial_C F_R = \int dr dz 2\pi r \partial_c j_{P,(r,z)} B_{Z,(r,z)}$$

式(2)の運動方程式に、プラズマ電流、コイル電流、渦電流の作るポロイダル磁束の保存から得られる、回路方程式を連立させて解く。これにより、トロイダル方向に誘起される電流を求めることができる。トロイダル磁束の保存については、プラズマのポロイダル断面における二次元的な運動に大きな影響を与えない仮定し、方程式系に含めないこととする。この仮定は、デスマッシュ等により、プラズマが消滅するような変化が起こって、大きなハロー電流が流れる場合を除いて、有効な仮定であると考えられる。つまり、本コードではハロー電流を無視する近似を用いる。このとき、プラズマ電流、コイル電流、渦電流の回路方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 A_{3,1} \delta \dot{Z}_P + A_{3,2} \delta \dot{R}_P + L_P I_P \left(\frac{\delta I_p}{I_p} \right) + \sum_j^{coil} I_p M_{p,j} \left(\frac{\delta I_j}{I_p} \right) + \sum_\alpha^{eddy} I_p G_{p,\alpha} \left(\frac{\delta \dot{X}_\alpha}{I_p} \right) \\
 + (\eta_p - \eta_{p,0}) I_{p,0} + I_p \eta_p \left(\frac{(I_p + \delta I_p - I_{p,0})}{I_p} \right) + K_C \delta \dot{C} = 0 \\
 I_p \partial_Z M_{p,j} \delta \dot{Z}_P + I_p \partial_R M_{p,j} \delta \dot{R}_P + I_p M_{p,j} \left(\frac{\delta I_p}{I_p} \right) + \sum_k^{coil} I_p M_{j,k} \left(\frac{\delta I_k}{I_p} \right) \\
 + \sum_\alpha^{eddy} I_p G_{j,\alpha} \left(\frac{\delta \dot{X}_\alpha}{I_p} \right) + \eta_j I_p \left(\frac{1}{I_p} (I_j + \delta I_j - I_{j,0}) \right) + I_p \partial_C M_{p,j} \delta \dot{C} = V_j \quad (6) \\
 I_p \partial_Z G_{p,\alpha} \delta \dot{Z}_P + I_p \partial_R G_{p,\alpha} \delta \dot{R}_P + I_p G_{p,\alpha} \left(\frac{\delta I_p}{I_p} \right) + \sum_j^{coil} I_p M_{j,\alpha} \left(\frac{\delta I_j}{I_p} \right) \\
 + D_\alpha I_p \left(\frac{\delta \dot{X}_\alpha}{I_p} \right) + I_p \left(\frac{1}{I_p} (X_\alpha + \delta X_\alpha) \right) + I_p \partial_C G_{p,\alpha} \delta \dot{C} = 0
 \end{aligned}$$

ただし、コイルを表わすのにアルファベットを添え字として用い、渦電流をギリシャ文字で表わすこととする。 V_j はコイル電圧、 $G_{j,\alpha}$ は j -番目コイルと α -一番目渦電流モードとの磁気結合係数、 D_α は渦電流固有モードの固有値を表わし、また次の定義を用いた。

$$\begin{aligned}
A_{3,1} &= A_{1,3} = \sum_j^{coil} \partial_z M_{P,j} I_j + \sum_\alpha^{eddy} \partial_z G_{P,\alpha} X_\alpha \\
A_{3,2} &= I_p C_L \mu_0 (\ln(8R_p/a_p) + \ell_i/2 - 3/2) + \sum_j^{coil} \partial_R M_{P,j} I_j + \sum_\alpha^{eddy} \partial_R G_{P,\alpha} X_\alpha \\
K_C &= \sum_j^{coil} \partial_C M_{P,j} I_j + \sum_\alpha^{eddy} \partial_C G_{P,\alpha} X_\alpha + \frac{1}{2} C_L \mu_0 R_p \partial_C \ell_i
\end{aligned}$$

式(2)、(3)に於いて、 I_p , R_p , a_p , I_j , X_α や磁気結合係数は平衡配位を求めた時刻での値であり、 $I_{p,0}$, $I_{j,0}$, $\eta_{p,0}$ など 0 の添え字の付いたものは時刻 0 の平衡配位での値である。

式(2)と(6)をまとめて、行列形式で次のように表わすことができる。

$$AY + RY = B \quad (6')$$

行列 A, R, ベクトル B の定義は次の通りである。

$$A = \begin{pmatrix}
2\pi B_i n & -2\pi B_i k & A_{1,3} & \cdots & I_p \partial_z M_{p,i} & \cdots & \cdots & I_p \partial_z G_{p,\alpha} & \cdots \\
-2\pi B_{vo} k & A_{2,2} & A_{2,3} & \cdots & I_p \partial_R M_{p,i} & \cdots & \cdots & I_p \partial_R G_{p,\alpha} & \cdots \\
A_{3,1} & A_{3,2} & I_p L_p & \cdots & I_p M_{p,i} & \cdots & \cdots & I_p G_{p,\alpha} & \cdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \ddots \\
I_p \partial_z M_{p,i} & I_p \partial_R M_{p,i} & I_p M_{p,i} & \cdots & I_p M_{i,j} & \cdots & I_p G_{i,\alpha} & \cdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & 0 \\
I_p \partial_z G_{p,\alpha} & I_p \partial_R G_{p,\alpha} & I_p G_{p,\alpha} & \cdots & I_p G_{i,\alpha} & \cdots & I_p D_\alpha & \cdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & 0 & \ddots
\end{pmatrix}$$

$$R_{diag} = (0, 0, I_p \eta_p, \cdots, I_p \eta_i, \cdots, I_p \cdots)$$

$$B = \begin{pmatrix}
2\pi R_p \dot{B}_{R,d} - \partial_C F_Z \delta \dot{C} / I_p \\
-\frac{1}{2} \mu_0 I_p C_F C_\beta \Delta \dot{P} - 2\pi R_p \dot{B}_{Z,d} - \left[\frac{1}{4} C_F \mu_0 I_p^2 \partial_C \ell_i + \partial_C F_R \right] \delta \dot{C} / I_p \\
-(\eta_p - \eta_{p,0}) I_{p,0} - I_p \eta_p \left(\frac{(I_p - I_{p,0})}{I_p} \right) - K_C \delta \dot{C} \\
\vdots \\
V_i - \eta_j I_p \left(\frac{1}{I_p} (I_j - I_{j,0}) \right) - I_p \partial_C M_{p,j} \delta \dot{C} \\
\vdots \\
-I_p \left(\frac{1}{I_p} X_\alpha \right) - I_p \partial_C G_{p,\alpha} \delta \dot{C} \\
\vdots
\end{pmatrix}$$

2. 3 プラズマ平衡解析

先に述べたように、DPSコードではプラズマ平衡の変化を考慮してプラズマの運動を解く。図2-1に示すように、プラズマ運動方程式のあるプラズマ配位で線形化し、プラズマの変位があらかじめ定めた値より大きくなるか又ある時間以上時間発展が経過した場合、プラズマの配位を新たな条件のもとに求め、プラズマ運動方程式を新たな配位について線形化し、プラズマの運動を解く。真空容器等に誘起される渦電流の安定化効果が利く場合、プラズマの運動は渦電流の時定数程度に安定化される。このようなプラズマ平衡の準静的配位は、グラドーシャフランノフ方程式を解くことで得られる。

グラドーシャフランノフ方程式は通常微分方程式で与えられるが、ここでは次の積分方程式の形で解く [5]。

$$\Psi^P(r, z) = \iint_{\text{plasma}} d\rho d\eta \Phi(r, z; \rho, \eta) j_\phi(\rho, \eta) \quad (7)$$

ただし、 Ψ^P はプラズマ電流トロイダル成分 j_ϕ の作る磁束関数であり、グリーン関数 Φ は橜円関数で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \Phi(r, z; \rho, \eta) &= \frac{\mu_0}{\pi k} \sqrt{r\rho} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right\} \\ k^2 &= \frac{4r\rho}{(r + \rho)^2 + (z - \eta)^2} \end{aligned}$$

また、プラズマ電流トロイダル成分は全磁束の関数として式(5)で与えられる。

初期状態では、全磁束はコイルの作る磁束 Ψ^C と式(7)で与えられるプラズマ電流の作る磁束 Ψ^P の和で表わせるが、プラズマの運動中では渦電流が作る磁束 Ψ^E を考慮する必要がある。よって、全磁束 Ψ^T はこれらの和で表わせられる。

$$\Psi^T = \Psi^C + \Psi^P + \Psi^E$$

このように、グラドーシャフランノフ方程式は磁束関数について非線形方程式をなす。

また、平衡の収束条件として、式(7)の他にプラズマ電流中心位置及びプラズマ圧力の体積積分が、目標値に対してある許容範囲にあることを要請する。

式(7)を解くためには、プラズマの境界を指定する必要がある。プラズマの初期配位は、ダイバータ及びリミター配位をしておりその境界は明らかである。

しかしながら、プラズマの運動と共にプラズマの形状が著しく変化した場合でも一意的に境界（セパラトリックス）を決定できるよう、第一壁に接しない閉じた磁気面を境界とする定義を用いた。このため、本コードでは第一壁の形状データを

記録したファイルを用意する必要がある。

2. 4 制御シミュレーションの方法

本コードは、計測を含めたプラズマ制御系を模擬するために、幾つかのシミュレーションパラメータを持つ。まず、計測・制御系を模擬するためのパラメータに、サンプルホールド時間、計測系に起因する遅れ時間がある。制御を開始する条件は、プラズマの標準位置からのずれが (Z_0, R_0) 以上になったことを検出した時とし、 (Z_0, R_0) は入力値とする。

プラズマ位置制御は、プラズマ電流中心の標準値からのずれをコイル電圧にフィードバックして行う。制御方式はPID制御を用いる。制御利得はプラズマの水平方向のずれと垂直方向のずれについてそれぞれ独立に入力する形式をとる。例えば、 i -番目のコイルの制御電圧は次式で与えられる。

$$V_i = G_{P,Z} \left(\delta Z + G_{D,Z} \delta \dot{Z} + G_{I,Z} \int_{t_0}^t dt \delta Z \right) + G_{P,R} \left(\delta R + G_{D,R} \delta \dot{R} + G_{I,R} \int_{t_0}^t dt \delta R \right)$$

また、プラズマが標準状態からずれる原因となる、プラズマに掛かる擾乱としては幾つかのオプションを用意する。それらは、水平・垂直成分を持つ擾乱磁場、プラズマ熱エネルギーの変化、プラズマ電流分布の変化、プラズマ電流中心移動、及びプラズマ抵抗の変化である。プラズマ電流中心移動は、初期値として与え、その他の擾乱の時間変化は、ある時定数 τ で変化するものとする。例えば、水平擾乱磁場の時間変化は次の式で与えられる。

$$\delta B_r(t) = \delta B_{r_0} \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

3. 使用手引き及び計算例

3. 1 入力データの解説

DPSコードは、4種類の入力ファイルを必要とする。

- 1、プラズマ平衡計算の出力ファイル。
- 2、渦電流計算結果出力ファイル。
- 3、制御シミュレーションパラメータファイル。
- 4、第一壁の位置が収められたファイル。

1 プラズマ平衡計算結果出力ファイル

プラズマ平衡計算コードEQUCIRのデータベース出力オプションにより作成されるデータベースファイルをそのまま使用する。

FT17F001により読み込むこととする。図3-1にファイルの一部を示す。始めの2行はコメント文(1)、次の3行が平衡計算のメッシュの情報(2)、引き続きコイルのデータ(3)、その後に平衡計算の結果(4)が記されている。

2 渦電流結果出力ファイル

渦電流解析コードEDDYCALにより出力されるファイルを使用する。FT20F001により読み込むこととする。図3-2にファイルの一部を示す。始めの2行はコメント文(1)、次の3行が渦電流計算のメッシュの情報(2)、引き続きコイルのデータ(3)、その後に渦電流解析の結果(4)が記されている。

3 制御シミュレーションパラメータファイル

ここでは、実際に使用するデータファイルを例にして説明することとする。FT15F001より読み込む。図3-3に制御シミュレーションファイル例を示す。

(1) パラメータファイルのコメント 2行。 2 (18A4)
図形出力の際にこのコメントが表示される。

(2) オプションフラグ iopt (20I3)
 $\text{iopt}(1) = 1$ 時間発展計算を行う
 $= 0$ 時間発展計算を行わない

iopt(2) > 0	プラズマ断面形状磁気面を出力する
= 0	プラズマ断面形状磁気面を出力しない
iopt(3) = 1	FORT38にプラズマパラメータを出力する
= 0	FORT38にプラズマパラメータを出力しない
iopt(4) = 1	作図出力を行う
= 0	作図出力を行わない

IOPT(2)が1以上のとき、プラズマの平衡配位の情報をIOPT(2)回平衡計算するごとにファイルに出力する。

(3) 時間発展制御パラメータ

TEND, TSTEP1, TSTEP2, TCTL (10E12.4)

TEND = 時間発展終了時間(UNIT:秒)

TSTEP1=時間発展のステップ間隔

TSTEP2=dummy

TCTL =dummy

TSTEP2,TCTLについては、現在使用していないが、プログラム上のINPUTパラメータは存在しているために、dummyデータを入力しておく必要がある。

(4) シミュレーションパラメータ1 THOLD (10E12.4)

サンプルホールド時間

(5) シミュレーションパラメータ2 DDT, TDIA (10E12.4)

DDT：時間<DDTでは制御は働かない。

TDIA=計測系からの信号遅れ時間。

(6) シミュレーションパラメータ3 ZSTART, ZSHA (10E12.4)

ZSTART=プラズマ垂直位置ずれが、ZSTART以上になった時に制御を開始する。ZSHRは現在使用していないがDummy入力が必要。

(7) シミュレーションパラメータ4 RSTART, RSHA (10E12.4)

RSTART=プラズマ水平位置ずれが、RSTART以上になった時に制御を開始する。RSRHは現在使用していないがDummy入力が必要。

(8) シミュレーションパラメータ 5

ITEMAX, NSTEP, CSFT, NWINT (2I12,F12.0,I12)

ITEMAX = 平衡計算を行う際の最大回数を指定する。
NSTEP = 新しいプラズマ配位を求めるまでの線形化された時間発展の最大ステップ数
CSFT = CSFT設定以上プラズマ中心が移動した場合、新しいプラズマ配位を求める
NWINT = $\delta R, \delta Z, \delta I_p, \dots$ 等々を出力するステップ間隔

(9) シミュレーションパラメータ 6

CRP, CZP, DENAV (10E12.4)

CRP	=	初期平衡配位に於けるプラズマ中心位置 (unit:m)
CZP	=	初期平衡配位に於けるプラズマ中心高さ (unit:m)
DENAV	=	プラズマ平均密度 (unit:1/m ³)

(10) シミュレーションパラメータ

PLRES,CSTEP,ALFC (10E12.4)

PLRES	=	プラズマの一周期抵抗
CSTEP	=	プラズマ平衡計算コード(EQUCIR)のInputパラメータであるPCONST(12)の値を入力する
ALFC	=	プラズマ平衡計算コード(EQUCIR)のInputパラメータであるPCONST(15)の値を入力する (現バージョンではダミー変数)

(11) シミュレーションパラメータ8 NR,NZ (2013)

計算領域の分割数

NR: R 方向

NZ：Z方向

但し NR,NZ共に 2^n+1 でなければならぬ。

(12) シミュレーションパラメータ9 RMIN,RMAX (10E12.4)

計算領域を指定

RMIN : R方向最小値 (unit:m)
 RMAX : R方向最大値 (unit:m)

(13) シミュレーションパラメータ10 ZMIN,ZMAX (10E12.4)

計算領域を指定

ZMIN : Z方向最小値 (unit:m)
 ZMAX : Z方向最大値 (unit:m)

(14) シミュレーションパラメータ11

PRMIN,PRMAX,PZMIN,PZMAX,PRL,PZL (10E12.4)

IOPT(4)=1 の時 作図出力する際の出力位置等を指定する。

PRMIN = R方向最小位置 (unit:m)
 PRMAX = R方向最大位置 (unit:m)
 PZMIN = Z方向最小位置 (unit:m)
 PZMAX = Z方向最大位置 (unit:m)
 PRL = NLP出力時のR方向実寸法 (unit:cm)
 PZL = NLP出力時のZ方向実寸法 (unit:cm)

(15) シミュレーションパラメータ12 NC,NCC,NQ,NQC (10E12.4)

コイル情報を設定する。

NC : PFコイルのシリーズ総数
 NCC : PFコイルの総数
 NQ : 制御用コイルのシリーズ総数
 NQC : 制御用コイルの総数

(16) シミュレーションパラメータ13 (NCB(I),I=1,NC+NQ) (20I3)

シミュレーションパラメータ12で指定した、コイル及び制御コイル各シリーズのコイル数を指定する。

(17) シミュレーションパラメータ14

TM(I),RM(I),ZM(I),AM(I),BM(I),RESV(I) (10E12.4)

シミュレーションパラメータ12,13で設定したコイルの詳細情報を見つける。(NC+NQ分設定する)

TM : コイルの巻数（電流の相対符号 プラズマ電流と同じ向きの時は正 (+)、逆向きの時は負 (-) とする。）
 RM : コイルの中心水平座標 (unit:m)
 ZM : コイルの中心高さ座標 (unit:m)
 AM : コイル断面の水平方向長さ (unit:m)
 BM : コイル断面の垂直方向長さ (unit:m)
 RESV: コイル導体の抵抗率 (unit: ΩM)

(18) シミュレーションパラメータ15 NCTL 20I3

プラズマ制御を行うコイルグループの総数を設定する。

(19) シミュレーションパラメータ16 MU(i) (20I3)

シミュレーションパラメータ15のNCTLが設定された場合にプラズマ制御を行うコイルシリーズの番号 (NC+NQに対応) 指定する。

(20) シミュレーションパラメータ17

DKDZ, DKPZ, DKIZ
 DKDR, DKPR, DKIR
 VMAXP, VMAXN, RSOU (10E10.4)

シミュレーションパラメータ16 NCTLにて設定した総数分に対して各々垂直、水平方向ゲイン及び制限電圧(最大&最小)を1セットとして設定する。

DKDZ : 垂直(Z)方向 微分ゲイン(unit:sec)
 DKPZ : 垂直(Z)方向 比例ゲイン(unit:V/m)
 DKIZ : 垂直(Z)方向 積分ゲイン(unit:1/sec)
 DKDR : 水平(R)方向 微分ゲイン(unit:sec)
 DKPR : 水平(R)方向 比例ゲイン(unit:V/m)
 DKIR : 水平(R)方向 積分ゲイン(unit:1/sec)
 PMAXP : 制限電圧 (上限) (unit:V)
 PMAXN : 制限電圧 (下限) (unit:V)
 RSOU : コイルシリーズに接続された電源の抵抗
 (unit: Ω)

(21) 摘乱の設定1 BDZ0,TAUDZ (10E12.4)

垂直擾乱磁場の大きさ(unit:テスラ) 及び時定数(unit:1/sec)

(22) 摘乱の設定2 BDR0,TAUDR (10E12.4)

水平擾乱磁場の大きさ(unit:テスラ) 及び時定数(unit:1/sec)

(23) 摘乱の設定3 DCM0,TAUCM (10E12.4)

プラズマ電流分布のパラメータ変化、及び時定数(unit:1/sec)。

プラズマ電流分布は、磁束のパラボリックな関数で表わせると仮定している。DCM0はパラボリック関数の指數であり、これが大きい程、内部インダクタンスは大きくなる。(式(5)参照)

(24) 摘乱の設定4 DPA0,TAUDP (10E12.4)

プラズマ熱エネルギー変化、及び時定数(unit:1/sec)。DPA0は、失われるエネルギーの割合に対応する。

(25) 摘乱の設定5 ZINIT,RINIT (10E12.4)

時刻0秒でのプラズマ中心位置のずれ

ZINIT : 垂直方向のずれ (unit:m)

RINIT : 水平方向のずれ (unit:m)

(26) 摘乱の設定6 DRPL0,TAUDL (10E12.4)

プラズマ一周抵抗の時間変化パラメータ(unit: Ω)、

及び時定数(unit:1/sec)

4 第一壁の位置が収められたファイル

図3-4に、FT16T001より読む、第一壁の境界を収めたファイルの例を示す。一行目はコメント及びあとに続く点の数である。

二行目以降は、番号と点の(R,Z)座標である。最初の点と最後の点は、同一の位置で閉曲線を成していなくてはならない。

3. 2 計算結果及び出力データの例

計算結果として出力されるデータは、以下の5種類ある。

- 1、FT06T001で出力される、計算経過の情報。
- 2、FT37T001で出力される、プラズマ電流中心、プラズマ電流、制御コイル電流・電圧の時間変化。ここで出力されるコイルは、FT15のファイルで指定した制御に用いるコイルの数NCTLだけである。
- 3、FT38T001で出力される、プラズマパラメータ（主・小半径、非円形度、ポロイダルベータ値、内部インダクタンス他）の時間変化。
- 4、FT40T001以降に出力される、磁束関数及びプラズマ電流分布の情報。
- 5、カルコンプを用いてプリンターに出力される、プラズマ磁気面及び電流分布の図。

本コードでは、プラズマのパラメータはプラズマ及び渦電流の時間発展を考慮した平衡計算の結果求まるため、入力した擾乱のパラメータ通りの変化をプラズマパラメータがするとは限らない。そのため、プラズマパラメータが望む時間変化をしているかどうかFT38の出力を見て確認する必要がある。

以下に、ITER EDA 1995年5月中旬報告に於ける標準プラズマを用いて、マイナーディスラプションが起こったとき生ずると考えられるプラズマの擾乱、 $\delta\beta_p = -0.2$, $\delta\ell_i = -0.1$ 、が起こったとしてプラズマの位置制御を計算した例を示す。

図3-5は、プランケット第一壁・後壁及び真空容器のモデルである。これらのトロイダル方向の一一周抵抗はそれぞれ $20\mu\Omega$, $14.2\mu\Omega$, $13.2\mu\Omega$ である。

図3-6は、計算に用いたFT15の入力ファイルである（内容は図3-3と比較参照されたい）。制御コイルはPF2～PF8を用い、それぞれのコイル制御電圧の制限を10Vとした。マイナーディスラプションによるプラズマパラメータの変化は、1ミリ秒程度で起こると仮定している。この8秒間のシミュレーションに、IBMワークステーションRS6000-590を用いて、約3時間のCPU時間を要した。図3-7は、FT37で出力された結果から、プラズマ電流中心の時間変化を図にしたものである。同様に図3-8は、PF3コイルの制御電流・電圧の時間発展である。

先に述べたように、プラズマパラメータはコードの中の平衡計算の結果求まる。図3-9は、FT38で出力されたプラズマ内部インダクタンスとポロイダルベータ値の時間変化である。また、プラズマの垂直不安定性、垂直・水平運動の結合の大きさを示す、N-指数及びK-指数の時間発展を図3-10に示す。プラズマの熱エネルギーが失われると共に、プラズマの中心は内側に移動する。図3-11は、FT40番のファイル以降に出力された、時刻0秒と時刻0.8秒の磁気面を比較したものである。プラズマ中心は、内側に移動するものの、プラズマ表面は渦電流の効果のためにさほど大きく動いていない。また、プラズマ電流分布が平坦化し内部インダクタンスが減少するときの特徴である、プラズマの径方向の広がり

が収縮しプラズマが縦長になる様子がこの図に見ることができる。

4. まとめ

プラズマの形状の変化の効果を考慮した、プラズマ制御シミュレーションコード（DPSコード）を開発した。本コードは、プラズマの熱エネルギーの損失が比較的少ないものの、プラズマ形状変化の効果が無視できない、マイナーディスラプション発生時に、プラズマを制御し所定のプラズマに戻す過程を解析するのを主なる目的として開発された。プラズマの運動はトロイダル対称性を仮定しており、ポロイダル断面での2次元的な運動・変形を記述する。また、渦電流は有限要素法を用いているため、3次元的な渦電流の流れの記述が可能である。

本報告書で解説したDPSコードは、プラズマの形状変化がプラズマの運動に影響を与えるほど大きい場合でも、使用可能なように作られている。本コードが、どの程度の大きさの擾乱が起こったときのプラズマの運動まで正しく記述しているかについての定量的判断基準は残念ながらない。定性的な判断基準は幾つか列挙することが可能である。一つは、トロイダル方向に高モードの揺らぎが生じていないということである。二つめは、ハロー電流が大きく流れないとすることである。第二点目については、ハロー電流はプラズマの動きを緩和する働きがあることから、ハロー電流を考慮しない現在のDPSコードは、プラズマが炉内構造物に接するかという問題については、安全サイドの結果を与えることになる。

本コードは平衡計算を繰り返し行うため、若干長めの計算時間を要する。一方、平衡計算を含まない線形コード（Accord1, Accord2）もあり、DPSコードと組合わせることにより、制御系の設計に必要なシミュレーションが可能となる。今後の課題としては、ギャップの制御を正確にシミュレーションすること、また計測やプラズマ位置・形状の同定を含めたシミュレーションを行うことなどが挙げられる。特に二点目は、ITERの様に真空容器・炉内構造物の一一周抵抗が小さいトカマク炉にとって、重要な課題である。また、ディスラプション時の電磁力を簡易的に評価するために、ハロー電流の効果を含めたプラズマ運動のシミュレーションコードを開発する必要があると考えられる。

が収縮しプラズマが縦長になる様子がこの図に見ることができる。

4. まとめ

プラズマの形状の変化の効果を考慮した、プラズマ制御シミュレーションコード（DPSコード）を開発した。本コードは、プラズマの熱エネルギーの損失が比較的少ないものの、プラズマ形状変化の効果が無視できない、マイナーディスラプション発生時に、プラズマを制御し所定のプラズマに戻す過程を解析するのを主なる目的として開発された。プラズマの運動はトロイダル対称性を仮定しており、ポロイダル断面での2次元的な運動・変形を記述する。また、渦電流は有限要素法を用いているため、3次元的な渦電流の流れの記述が可能である。

本報告書で解説したDPSコードは、プラズマの形状変化がプラズマの運動に影響を与えるほど大きい場合でも、使用可能なように作られている。本コードが、どの程度の大きさの擾乱が起こったときのプラズマの運動まで正しく記述しているかについての定量的判断基準は残念ながらない。定性的な判断基準は幾つか挙げることが可能である。一つは、トロイダル方向に高モードの揺らぎが生じていないということである。二つめは、ハロー電流が大きく流れないとすることである。第二点目については、ハロー電流はプラズマの動きを緩和する働きがあることから、ハロー電流を考慮しない現在のDPSコードは、プラズマが炉内構造物に接するかという問題については、安全サイドの結果を与えることになる。

本コードは平衡計算を繰り返し行うため、若干長めの計算時間を要する。一方、平衡計算を含まない線形コード（Accord1, Accord2）もあり、DPSコードと組合わせることにより、制御系の設計に必要なシミュレーションが可能となる。今後の課題としては、ギャップの制御を正確にシミュレーションすること、また計測やプラズマ位置・形状の同定を含めたシミュレーションを行うことなどが挙げられる。特に二点目は、ITERの様に真空容器・炉内構造物の一一周抵抗が小さいトカマク炉にとって、重要な課題である。また、ディスラプション時の電磁力を簡易的に評価するために、ハロー電流の効果を含めたプラズマ運動のシミュレーションコードを開発する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] M. Kasai, A. Kameari, F. Matsuoka, K. Shinya, H. Iida and N. Fujisawa, Fusion Engrg. Des., 5 (1988) 343.
S. Nishio, M. Sugihara and Y. Shimomura, Fusion Engrg. Des., 23 (1993) 17.
I. Senda, S. Nishio, T. Tsunematsu, T. Nishino and H. Fujieda, JAERI-Tech 94-018.
- [2] R. Albanese, E. Coccorese, G. Rubinacci, Nucl. Fusion, 29 (1989) 1013.
- [3] S. C. Jardin, N. Pomphery and J. Delucia, J. Comput. Phys., 66 (1986) 481.
R. O. Sayer, Y.-K. M. Peng, S.C. Jardin, A. G. Kellman, J. C. Wesley, Nuclear Fusion, 33 (1993) 969.
- [4] 中村幸治・小関隆久、JAERI-M 9612.
亀有昭久・鈴木康夫、JAERI-M 7120
A. Kameari, J. Comput. Phys., 42 (1981) 124.
S. Nishio, T. Horie, IEEE Transaction on Magnetics, 26(1990) 865.
- [5] 二宮博正・亀有昭久・新谷吉郎、JAERI-M 9127.

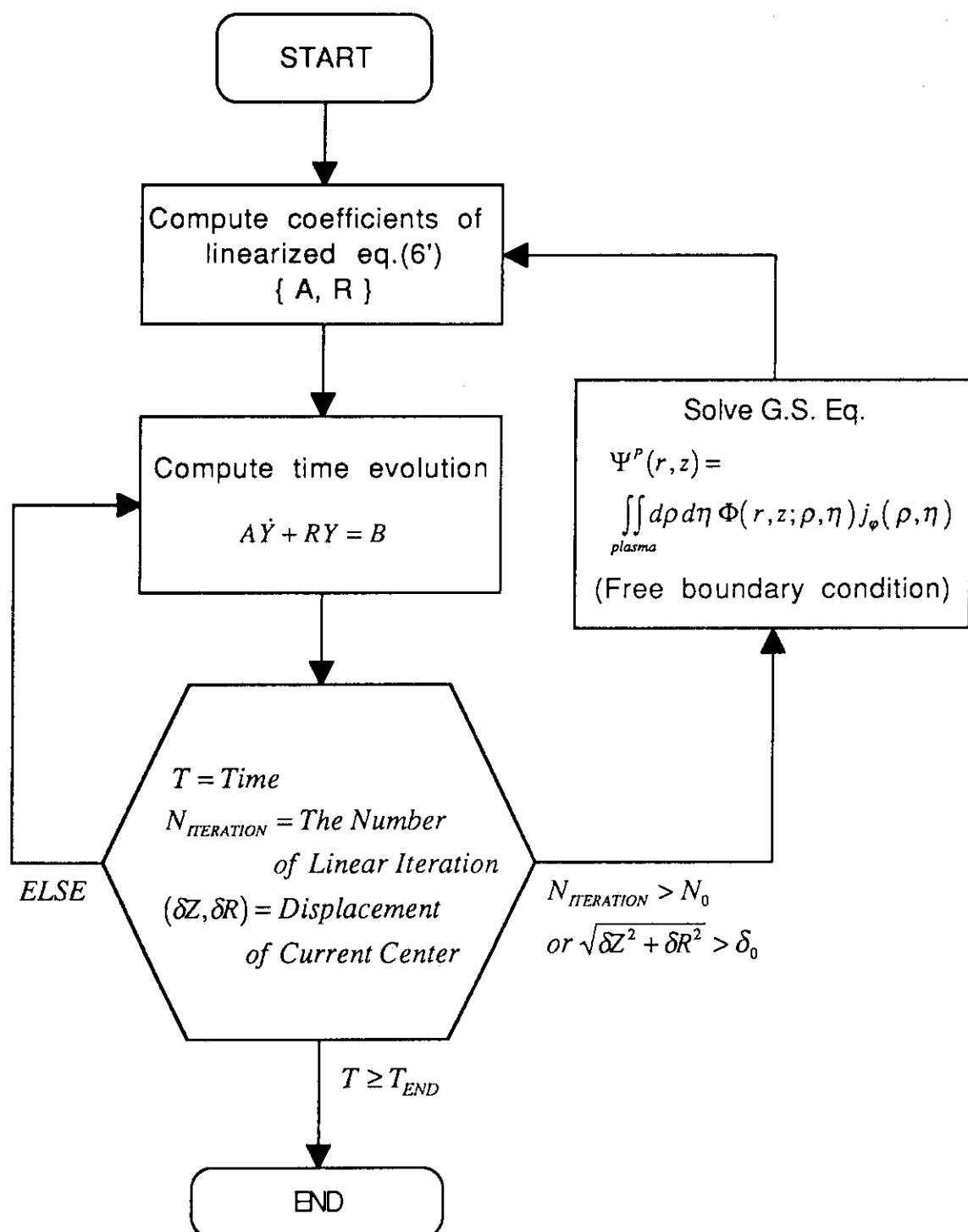


図 2-1 DPS コードの計算フローチャート

REBUT 94/03/28 IP=24.0MA CASE=REBUTHFD. DATA (C1E09Z) } (1) comment
 BETAP=0.70 LI(3)=0.90 PSI=-367 {E.O.B} RP=8.1, AP=3.0, K=1.55 }
 65 129 } (2) Mesh
 3.4170732E+00 1.2782927E+01 -9.1621037E+00 9.5696037E+00 1.4634146E-01 } Data
 1.4634146E-01
 7 11
 5 1 1 1 1 1
 1.0000000E+00 2.4475000E+00 4.8464000E+00 7.7500000E-01 2.4232000E+00 }
 1.0000000E+00 2.4475000E+00 2.4232000E+00 7.7500000E-01 2.4232000E+00 }
 1.0000000E+00 2.4475000E+00 0.0000000E+00 7.7500000E-01 2.4232000E+00 }
 1.0000000E+00 2.4475000E+00 -2.4232000E+00 7.7500000E-01 2.4232000E+00 }
 1.0000000E+00 2.4475000E+00 -4.8464000E+00 7.7500000E-01 2.4232000E+00 }
 1.0000000E+00 5.8287000E+00 9.5270000E+00 1.2000000E+00 1.2000000E+00 }
 1.0000000E+00 1.2799000E+01 7.2243000E+00 6.5000000E-01 1.1700000E+00 }
 1.0000000E+00 1.5064400E+01 -2.4804000E+00 6.5000000E-01 1.1700000E+00 }
 1.0000000E+00 1.3074000E+01 -7.4624000E+00 1.2000000E+00 1.2700000E+00 }
 1.0000000E+00 9.4590000E+00 -9.4854000E+00 9.0000000E-01 9.0000000E-01 }
 1.0000000E+00 5.8287000E+00 -9.5351000E+00 1.2000000E+00 1.2000000E+00 }
 -2.7922704E+07 -8.3369103E+06 -7.9737884E+06 -1.5604895E+07 -4.9801672E+05 }
 4.0551176E+05 8.1055353E+06 }
 2.4000000E+07 1.4821575E-05 1.0932140E+00 8.5983778E-01 9.0215519E-01 }
 -1.1893736E+01 -3.6699883E+02 7.0017280E-01 1.1450757E+00 7.3409049E-01 }
 3.2169937E-02 4.1874762E+05 2.3724910E+10 4.9324505E+09 -1.6351608E+08 }
 1.8053818E+08 4.3410973E+15 }
 8.0721435E+00 2.9559767E+00 5.1161668E+00 1.1028120E+01 8.2764101E+00 }
 8.1733545E+00 1.5327436E+00 8.4694187E+00 1.6130646E+00 9.5406336E+00 }
 1.6539873E+06 8.6078231E+00 1.6176016E+00 1.4175100E+06 4.2827300E+01 }
 2.1131754E+03 }
 7.0807506E+00 -4.1455560E+00 -1.9370530E+01 7.0807506E+00 -4.1455560E+00 }
 -1.9370530E+01 5.0858514E+00 6.1801226E+00 -2.1157921E+01 1.0618245E+00 }
 1.0365504E-01 1.8975310E-01 7.1426338E+00 7.0828094E+00 5.8855055E+00 }
 -4.1428526E+00 1.4453567E+00 1.9472133E+00 3.1445094E-01 3.3465558E-01 }
 8.1035915E+00 2.8412893E+00 1.6130646E+00 5.2623022E+00 1.0944881E+01 }
 7.3527123E+00 7.4765218E+00 5.6482711E+00 -3.1790694E+00 1.4202026E+00 }
 1.6866055E+00 2.6427413E-01 2.2069900E-01 }
 -7.5276768E-01 -7.3290561E-01 -7.2352402E-01 7.2515611E-01 7.7719862E-01 }
 9.5684052E+00 2.9441876E+00 2.1849762E+00 2.3723662E+00 2.3651362E+00 }
 9.5877447E-01 8.8304218E-01 8.8574158E-01 1.6512611E+00 1.3040565E+00 }
 1.2662497E+00 5.7196704E+00 }
 -6.0797417E-01 2.3713179E-02 6.2333786E-01 -2.5126549E-01 6.1922305E-01 }
 -4.8630265E-01 -8.1528491E-02 3.1799043E-03 8.3588740E-02 -3.3694353E-02 }
 8.3036950E-02 -6.5212509E-02 }
 6.1297965E+00 6.4842050E+00 1.1973492E+00 1.0578173E+00 1.9533261E-01 }
 9.7503178E-01 1.0000000E+00 1.1521642E+05 3.6997709E+06 6.7139788E-01 }
 -7.1321412E-01 -1.5993449E-01 9.9261227E-02 3.2028412E-03 -6.1236457E-01 }

(3) Data of coils

(4) Result of equilibrium computation

図3-1 プラズマ平衡計算コード出力データベースファイル例

STR. =VV (26M. OHM) +BP (16M. OHM) +FW (100M. OHM)
 PLASMA=CASE1 } (1) comment
 18 27 } (2) mesh data
 4.78289986E+00 1.14171000E+01
 -5.57009983E+00 6.70930004E+00
 11 74 } (3) Data of coils
 2.44749993E-01 4.84639972E-01 7.7500006E-02 2.42319986E-01 1.71999996E-08
 2.44749993E-01 2.42319986E-01 7.7500006E-02 2.42319986E-01 1.71999996E-08
 2.44749993E-01 0.0000000E+00 7.7500006E-02 2.42319986E-01 1.71999996E-08
 2.44749993E-01-2.42319986E-01 7.7500006E-02 2.42319986E-01 1.71999996E-08
 2.44749993E-01-4.84639972E-01 7.7500006E-02 2.42319986E-01 1.71999996E-08
 5.82870007E-01 9.52700019E-01 1.20000005E-01 1.20000005E-01 1.71999996E-08
 1.27989995E+00 7.22429991E-01 6.49999976E-02 1.16999999E-01 1.71999996E-08
 1.50643992E+00-2.48040006E-01 6.49999976E-02 1.16999999E-01 1.71999996E-08
 1.30739999E+00-7.46240020E-01 1.20000005E-01 1.27000004E-01 1.71999996E-08
 9.45899963E-01-9.48540032E-01 8.99999961E-02 8.99999961E-02 1.71999996E-08
 5.82870007E-01-9.53509986E-01 1.20000005E-01 1.20000005E-01 1.71999996E-08
 7.32925415E-01 3.34124833E-01 2.74642646E-01 1.85077469E-01 1.71365768E-01 1.2 37E-02
 8.38377103E-02 6.80849850E-02 6.70789629E-02 5.83009310E-02 5.41726835E-02 4.9 53E-02
 4.03236672E-02 3.75621915E-02 3.46602686E-02 3.44159342E-02 3.14880759E-02 2.9 85E-02
 2.39942353E-02 2.05156356E-02 1.98531616E-02 1.88528486E-02 1.80394370E-02 1.7 - 06E-02
 1.63466651E-02 1.58046987E-02 1.46466000E-02 1.37164062E-02 1.35234073E-02 1.3 44E-02
 1.22008845E-02 1.17982961E-02 1.11441817E-02 1.10271722E-02 1.08276447E-02 1.0 77E-03
 7.28072738E-03 7.28044892E-03 6.42283401E-03 6.20149029E-03 5.78795653E-03 5.6 69E-03
 5.43844840E-03 5.43375500E-03 5.26144961E-03 5.14243543E-03 4.92681982E-03 4.9 94E-03
 4.42904839E-03 4.36476246E-03 4.33192868E-03 4.30186279E-03 4.18006722E-03 4.8 31E-03
 3.86918872E-03 3.79821239E-03
 -7.11951579E-04-7.57431204E-04-8.09249876E-04-8.66817369E-04-9.27205605E-04-9.8 52E-03
 -1.13468245E-03-1.15210412E-03-1.17709441E-03-1.19933614E-03-1.21795805E-03-1.2 39E-03
 -1.26480195E-03-1.27108640E-03-1.27525546E-03-1.27714837E-03-1.27679121E-03-1.1 - 60E-03
 -1.17920258E-03-1.11035560E-03-1.03684689E-03-8.09925608E-04-8.62627698E-04-9.2 82E-03
 -1.14043849E-03-1.18385453E-03-1.21000758E-03-1.23516307E-03-1.25762948E-03-1.2 75E-03
 -1.33275834E-03-1.34710397E-03-1.35944597E-03-1.36973709E-03-1.37797871E-03-

(4) Results of eddy current

図3-2 涡電流解析ファイル出力例

PARAMETER FOR PPCV3B, ITER EDA94. REF SHELL MODEL (1)
 USE FOR017_REF94Z FOR EQU. DATA <CHK6>

1 1 1 1 0 0 0 0 0 (2)
 5.0000E-01 0.2000E+00 5.0000E-01 0.2000E+00 (3)
 1.0000E-03 (4)
 1.0000E-03 0.1000E-02 (5)
 1.0000E-02 1.0000E-08 (6)
 1.0000E-02 1.0000E-08 (7)
 20 1000000 1.0000E-02 200 (8)
 8.1000E+00 1.5000E+00 1.0000E+21 (9)
 4.0000E-09 0.0000E+00 0.0000E+00 (10)
 33 65 (11)
 4.8000E+00 1.1400E+01 (12)
 -5.5000E+00 6.5000E+00 (13)
 3.0 13.0 -10.0 10.0 100.0 200.0 (14)
 7 11 0 0 (15)
 5 1 1 1 1 1 (16)
 1.0000E+00 2.4475E+00 4.8464E+00 7.7500E-01 2.4232E+00 0.0000E+00 (17)
 1.0000E+00 2.4475E+00 2.4232E+00 7.7500E-01 2.4232E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 2.4475E+00 0.0000E+00 7.7500E-01 2.4232E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 2.4475E+00 -2.4232E+00 7.7500E-01 2.4232E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 2.4475E+00 -4.8464E+00 7.7500E-01 2.4232E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 5.8287E+00 9.5270E+00 1.2000E+00 1.2000E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 1.2799E+01 7.2243E+00 6.5000E-01 1.1700E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 1.5064E+01 -2.4804E+00 6.5000E-01 1.1700E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 1.3074E+01 -7.4624E+00 1.2000E+00 1.2700E+00 0.0000E+00
 1.0000E+00 9.4590E+00 -9.4854E+00 9.0000E-01 9.0000E-01 0.0000E+00
 1.0000E+00 5.8287E+00 -9.5351E+00 1.2000E+00 1.2000E+00 0.0000E+00
 4 (18)
 2 3 5 6 (19)
 0.3000E+00 -6.0000E+02 0.0000E+00 #2 (20)
 0.3000E+00 6.0000E+02 0.0000E+00
 0.5000E+01 -0.5000E+01 0.0000E+00
 0.3000E+00 -6.0000E+02 0.0000E+00 #3
 0.3000E+00 -6.0000E+02 0.0000E+00
 0.5000E+01 -0.5000E+01 0.0000E+00
 0.3000E+00 6.0000E+02 0.0000E+00 #5
 0.3000E+00 -6.0000E+02 0.0000E+00
 0.5000E+01 -0.5000E+01 0.0000E+00
 0.3000E+00 6.0000E+02 0.0000E+00 #6
 0.3000E+00 -6.0000E+02 0.0000E+00
 0.5000E+01 -0.5000E+01 0.0000E+00
 0.0000E+00 1.0000E+04 (21)
 0.0000E-03 1.0000E-03 (22)
 0.0000E+00 1.0000E-03 (23)
 -0.5000E-01 1.0000E-03 (24)
 0.0000E+00 1.0000E-03 (25)
 0.0000E+00 1.0000E-03 (26)

図3-3 シミュレーションインプットデータ例

*** SERIES 29 (F. W. april 1995 design)

1	5.4000E+00	-5.3000E+00
2	6.0000E+00	-4.5500E+00
3	6.4000E+00	-3.6500E+00
4	6.0000E+00	-2.4000E+00
5	5.3000E+00	-1.0000E+00
6	5.2000E+00	0.0000E+00
7	5.2000E+00	2.0000E+00
8	5.2000E+00	4.0000E+00
9	5.5000E+00	5.4000E+00
10	6.0000E+00	5.9000E+00
11	7.0000E+00	6.1000E+00
12	8.0000E+00	5.9000E+00
13	9.0000E+00	5.4000E+00
14	1.0000E+01	4.5000E+00
15	1.0500E+01	3.7000E+00
16	1.1000E+01	2.8000E+00
17	1.1200E+01	1.5000E+00
18	1.1000E+01	0.3000E+00
19	1.0500E+01	-0.9000E+00
20	9.8000E+00	-2.0000E+00
21	9.0000E+00	-2.9000E+00
22	8.5000E+00	-3.2500E+00
23	8.0000E+00	-4.0000E+00
24	8.0000E+00	-4.5000E+00
25	8.4000E+00	-5.6000E+00
26	8.0000E+00	-5.3000E+00
27	7.0000E+00	-4.4000E+00
28	6.0000E+00	-5.0000E+00
29	5.4000E+00	-5.3000E+00

図3-4 第一壁の位置が収められたファイル

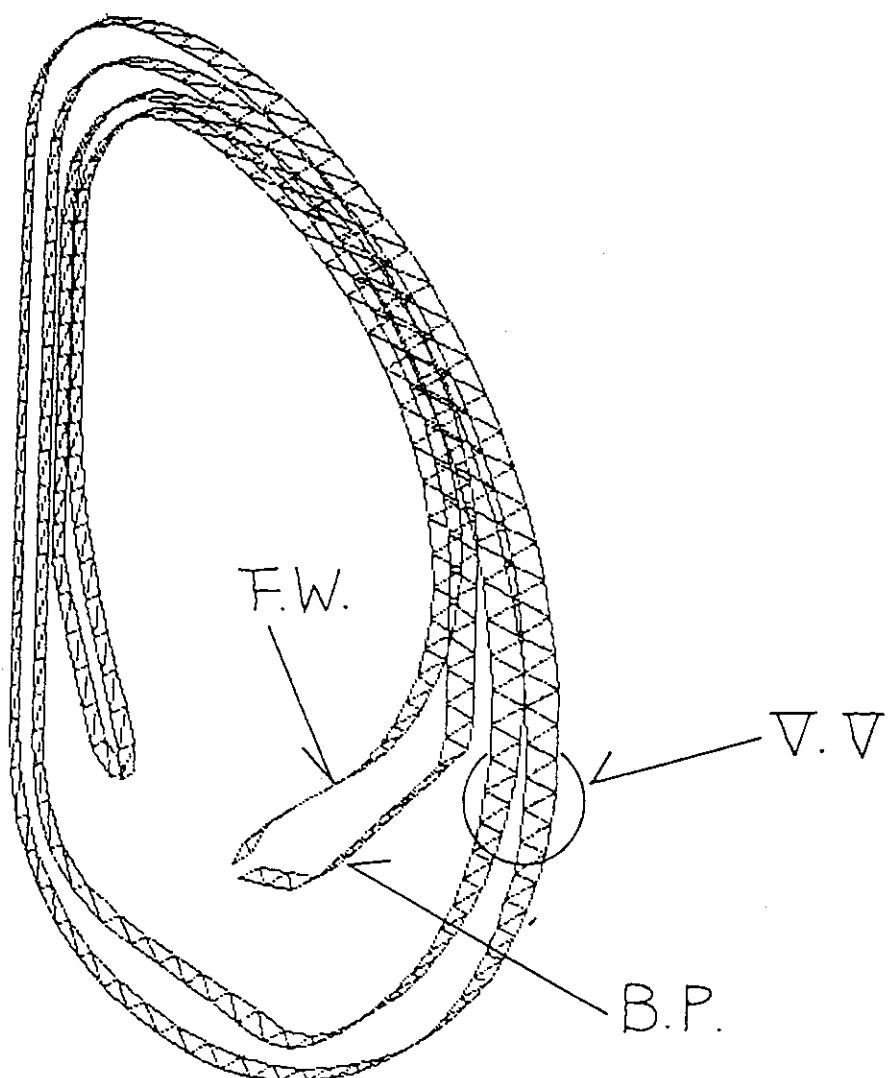


図 3-5 ITER EDA 1995/4 中間報告、ブランケット・真空容器のモデル

PARAMETER FOR PPCV4, April 95 REF SHELL MODEL
 USE FOR017_REF94z beta_p : 0.2 drop, li: 0.1 drop

1	5	1	1	1	0	0	0	0			
1.	2000E+01	2.	0000E-06	0.	0000E+00	0.	0000E+00				
1.	0000E-03										
2.	1000E-02	2.	1000E-02								
1.	0000E-02	1.	0000E-08								
1.	0000E-02	1.	0000E-08								
	100		250000	1.	0000E-02		2000				
8.	1000E+00	1.	4500E+00	1.	0000E+21						
1.	8000E-09	0.	0000E+00	0.	0000E+00						
33	65										
5.	0000E+00	1.	1500E+01								
-5.	7000E+00	6.	2000E+00								
8	12	0	0								
5	1	1	1	1	1	1					
1.	0000E+00	2.	3040E+00	4.	8400E+00	7.	4000E-01	2.	4200E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	2.	3040E+00	2.	4200E+00	7.	4000E-01	2.	4200E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	2.	3040E+00	0.	0000E+00	7.	4000E-01	2.	4200E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	2.	3040E+00	-2.	4200E+00	7.	4000E-01	2.	4200E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	2.	3040E+00	-4.	8400E+00	7.	4000E-01	2.	4200E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	5.	5890E+00	9.	9810E+00	1.	6710E+00	1.	5660E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	1.	2892E+01	7.	3890E+00	7.	4600E-01	1.	2220E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	1.	5364E+01	-2.	0900E+00	7.	3900E-01	2.	2620E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	1.	3198E+01	-7.	9430E+00	1.	3650E+00	1.	7820E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	9.	7030E+00	-9.	5830E+00	1.	1200E+00	1.	4220E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	5.	8590E+00	-9.	9810E+00	1.	6660E+00	1.	5660E+00	0.	0000E+00
1.	0000E+00	1.	4939E+01	3.	6910E+00	3.	6100E-01	5.	9000E-01	0.	0000E+00
7											
2	3	4	5	6	7	8					
0.	5000E+00	-5.	0000E+02	0.	0000E+00	#2					
0.	0000E+00	0.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	5000E+00	-5.	0000E+02	0.	0000E+00	#3					
0.	3000E+00	-6.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	5000E+00	5.	0000E+02	0.	0000E+00	#4					
0.	3000E+00	-6.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	5000E+00	5.	0000E+02	0.	0000E+00	#5					
0.	3000E+00	-6.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	5000E+00	5.	0000E+02	0.	0000E+00	#6					
0.	0000E+00	0.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	5000E+00	5.	0000E+02	0.	0000E+00	#7					
0.	0000E+00	0.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	5000E+00	-5.	0000E+02	0.	0000E+00	#8					
0.	3000E+00	-6.	0000E+02	0.	0000E+00						
1.	0000E+01	-1.	0000E+01	0.	0000E+00						
0.	0000E+00	-1.	0000E+04								
0.	0000E-03	1.	0000E-03								
-0.	1400E+00	0.	0010E+00								
-0.	3300E+00	0.	0010E+00								
0.	0000E-03	0.	0000E-03								
0.	0000E+04	0.	0100E+00								

図3-6 $\delta \beta_p = -0.2, \delta \ell_1 = -0.1$ の計算に用いたFT15のパラメータファイル

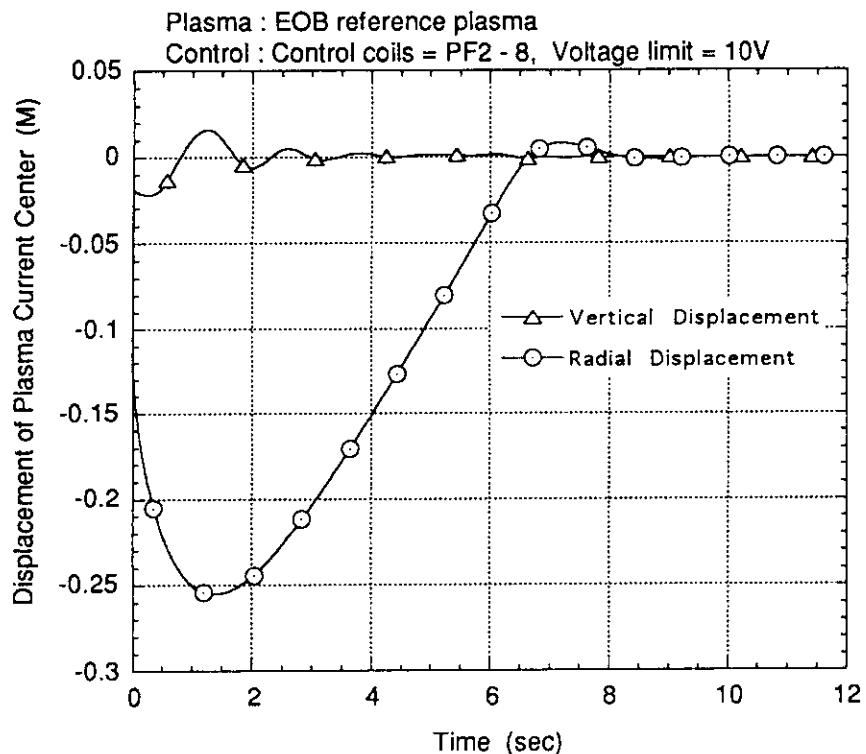
Time evolution of plasma current center in $\delta \beta_p = -0.2$ & $\Pi = -0.1$ 

図 3-7 プラズマ電流中心の平衡位置からのずれの時間変化

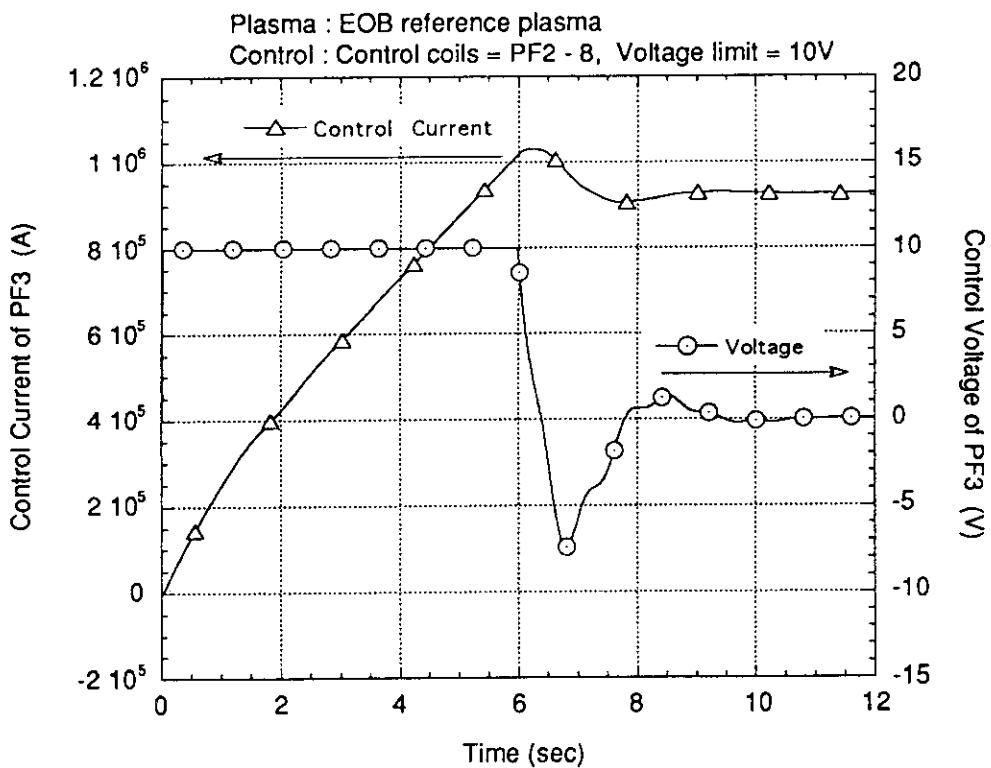
Control voltage and current of PF3 in $\delta \beta_p = -0.2$ & $\Pi = -0.1$ 

図 3-8 P F 3 コイルの電流・電圧の時間変化

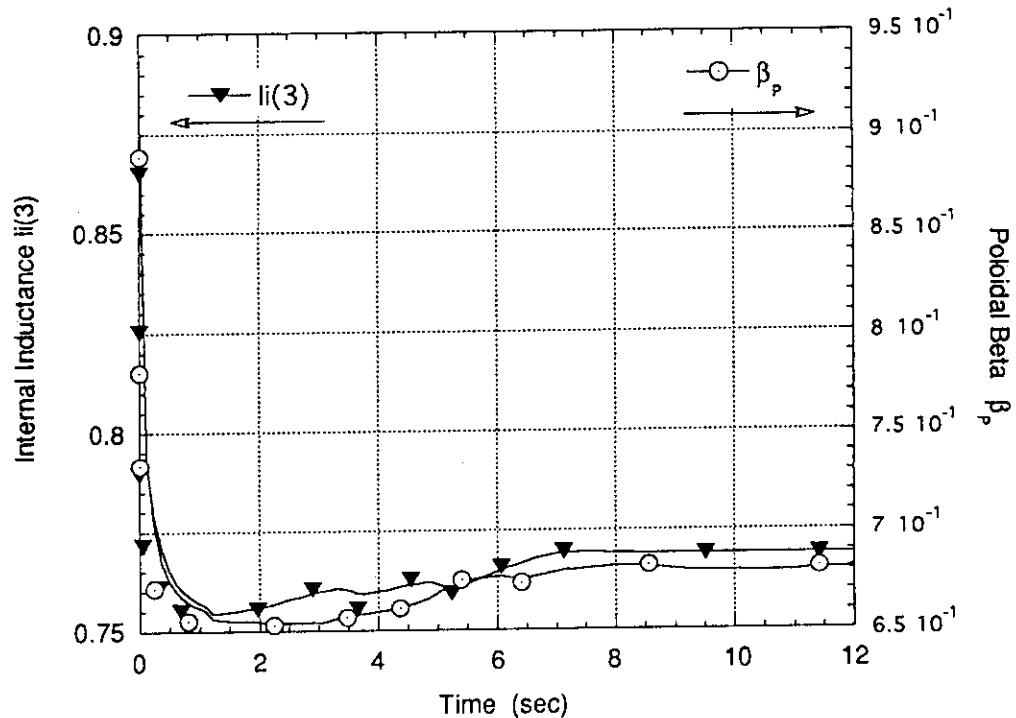
Time evolutions of β_p and $l_i(3)$ 

図3-9 内部インダクタンスとポロイダルベータ値の時間発展

Time evolutions of N-index and K index

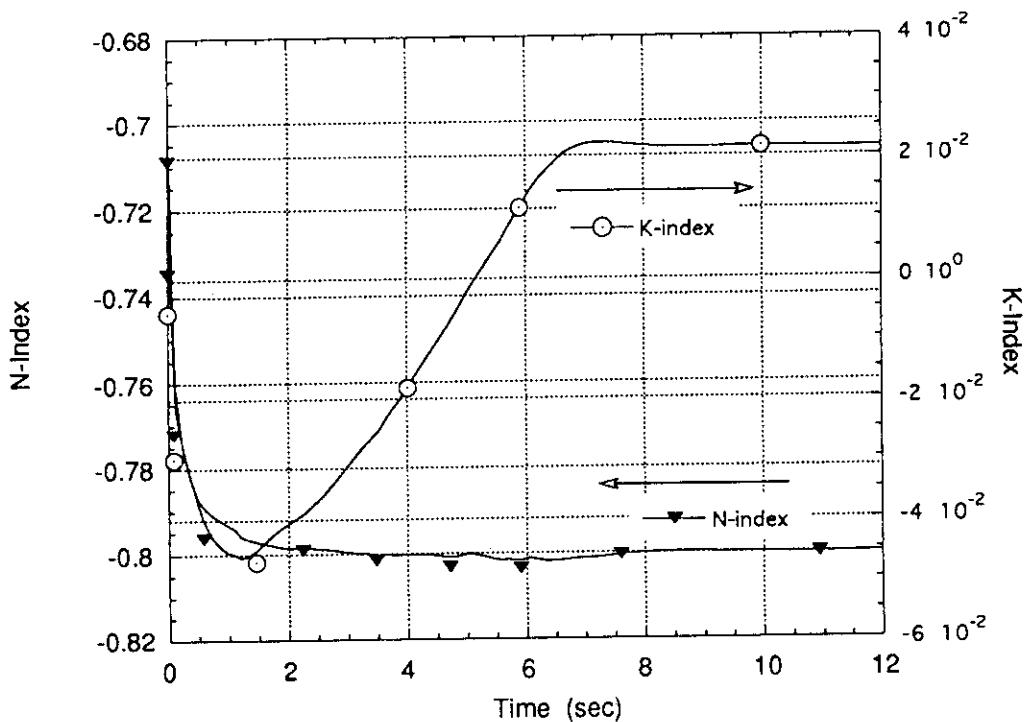


図3-10 N-指数とK-指数の時間発展

点線 = 時刻 0 秒 (初期値)
実線 = 時刻 0.8 秒

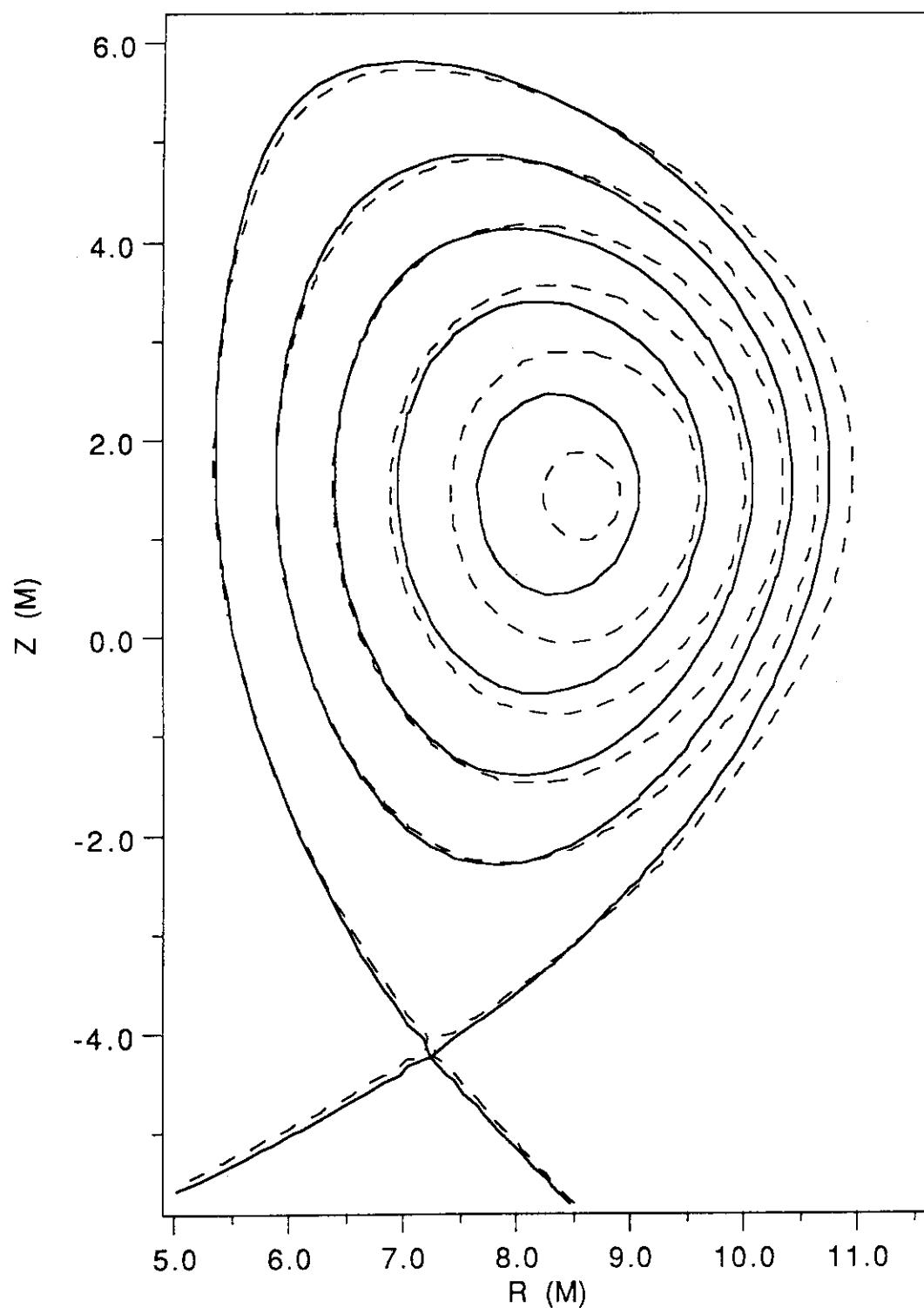


図 3-11 初期の磁気面と時刻0.8秒の磁気面の比較

付 錄

付録では、本文で述べたコードに幾つかの機能を加えたコードができる計算内容について紹介する。コードの詳細についての解説は省略する。

A. 1 セパラトリックスの時間変化を求めるシミュレーション

プラズマ擾乱により起こるプラズマの運動を制御する場合、プラズマのセパラトリックスが真空容器に触れるかどうかは、炉内構造物を保護するという制御系の役割から、たいへん重要な問題となる。そこで、セパラトリックスの位置の時間変化を求めるバージョンを作成した。予め入力データで指定した基準点を通りセパラトリックスに垂直に交わる点が、時間と共にどの様に変化するかを追跡する。

図A-1は、これらの基準点の例である。セパラトリックスの移動方向は、磁束関数が増える方向を正とする。図A-1では、矢印の方向が正の方向である。

図A-2、A-3に、図3-7の $\delta\beta_p = -0.2, \delta\ell_i = -0.1$ の擾乱が加わった時のシミュレーションの間のセパラトリックスの時間発展を示す。この結果から、制御により、プラズマは第一壁に接していないことがわかる。このセパラトリックスの時間変化は、平衡計算を行うごとに求めており、この値をフィードバックすることにより、第一壁とのギャップを制御することも可能である。

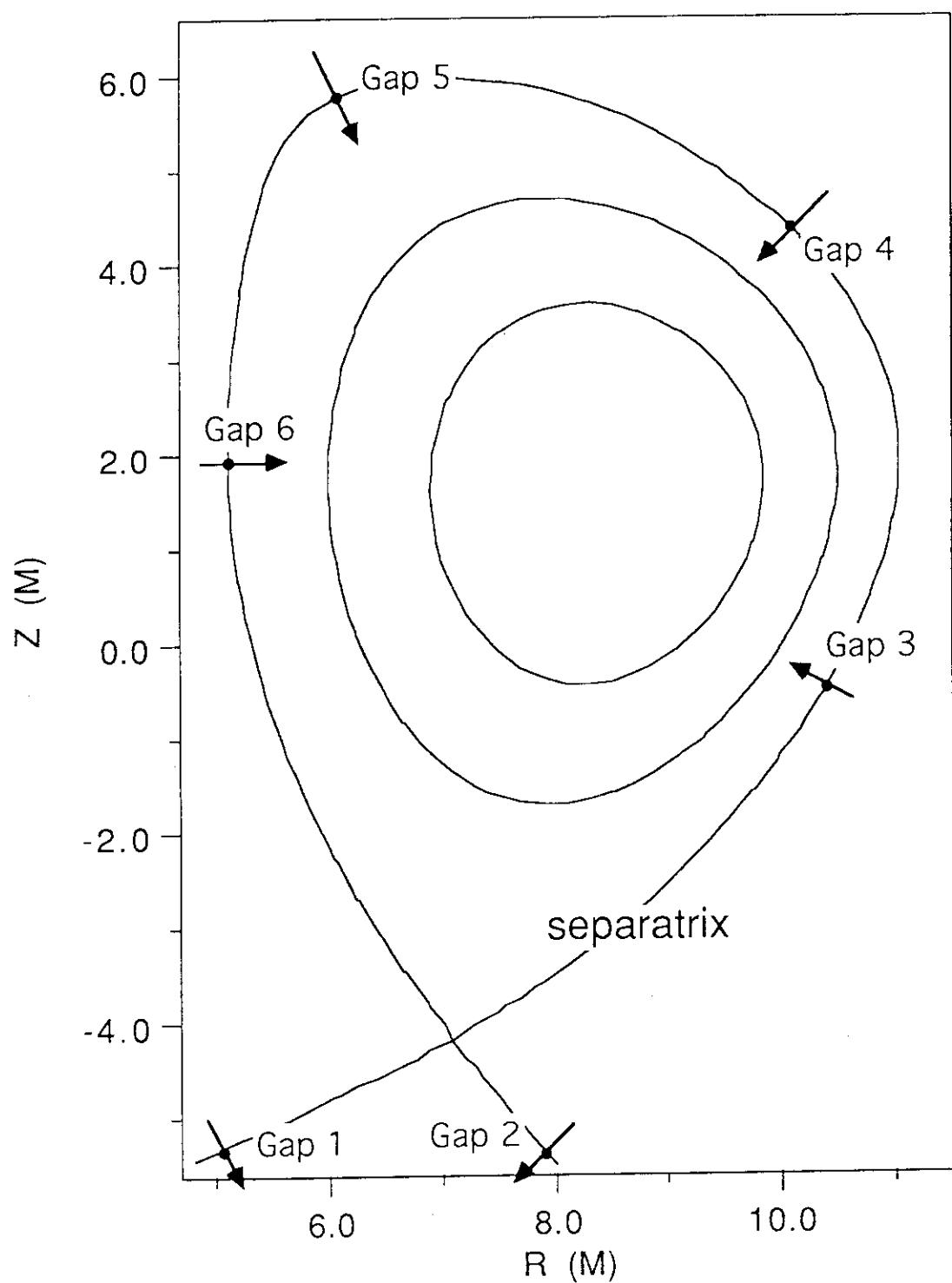
A. 2 コイル電圧・電力の時間微分に制限を設けたシミュレーション

電源の設計により、PFコイル系に供給できる電力や電力の時間変化に制限が加わる。これらの制限の、プラズマ制御に対する影響を評価するために、PFコイルに加える電圧の時間変化・電力の時間変化の大きさに制限を設けた時のシミュレーションを可能にした。制限は、電圧・電力の時間変化の絶対値について加える。

図A-4は0.2のポロイダルベータ値の減少が起こったとき、制御シミュレーションを電圧・電力の時間変化に制限を設けずに行った場合のPFコイルの全有効電力の時間変化である。一方、図A-5は同様のシミュレーションを、コイルに掛ける制御電圧の時間微分に $|dV_{coil}/dt| < 30V/sec$ の制限を付けて行ったときのPFコイルの全有効電力の時間変化である。図A-5より、電圧微分に制限を設けることにより、電力が急激に変化する箇所をなくすることがわかる。

図A-2、3の正の値は、セパラトリックス
の矢印の方向の運動を意味する。

→ Positive direction

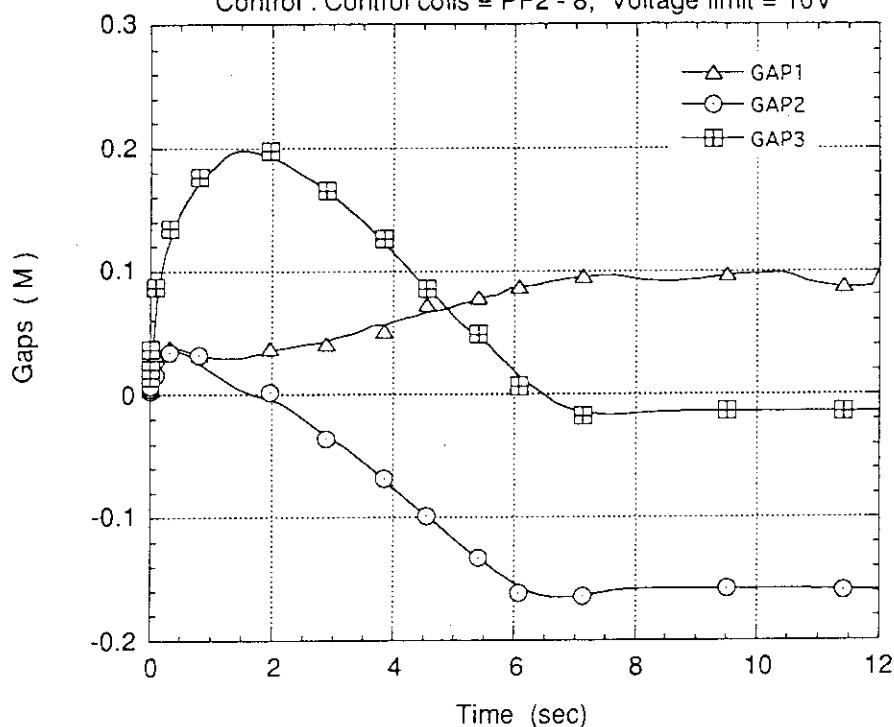


図A-1 セパラトリックスの基準点

Time evolution of the separatrix at 1, 2, 3 gaps in $\delta \beta_p = -0.2$ & $l_i = -0.1$

Plasma : EOB reference plasma

Control : Control coils = PF2 - 8, Voltage limit = 10V

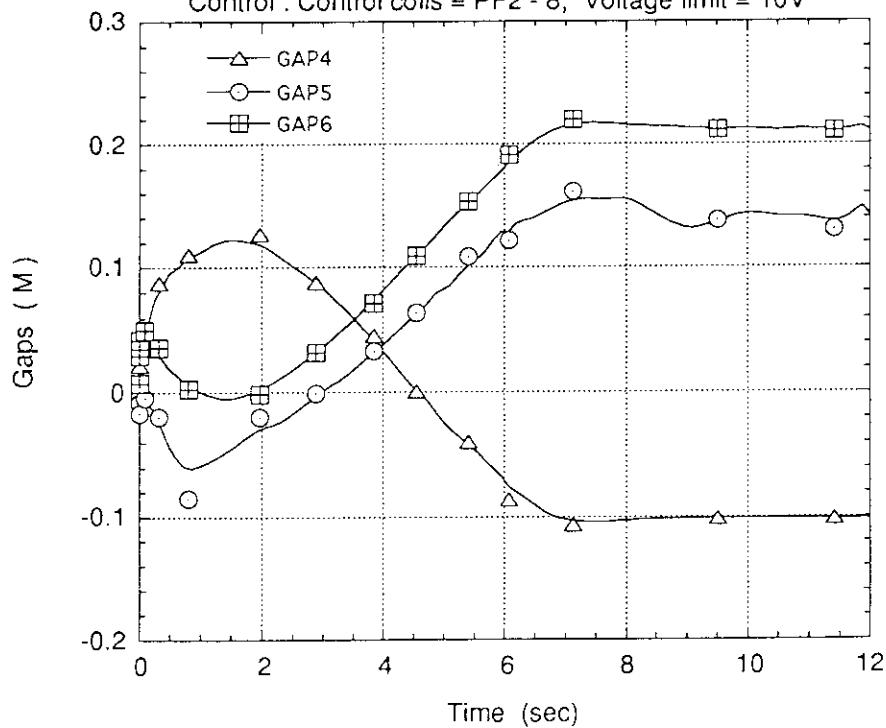


図A-2 図3-7のシミュレーションに於けるギャップ1, 2, 3の時間発展

Time evolution of the separatrix at 4, 5, 6 gaps in $\delta \beta_p = -0.2$ & $l_i = -0.1$

Plasma : EOB reference plasma

Control : Control coils = PF2 - 8, Voltage limit = 10V

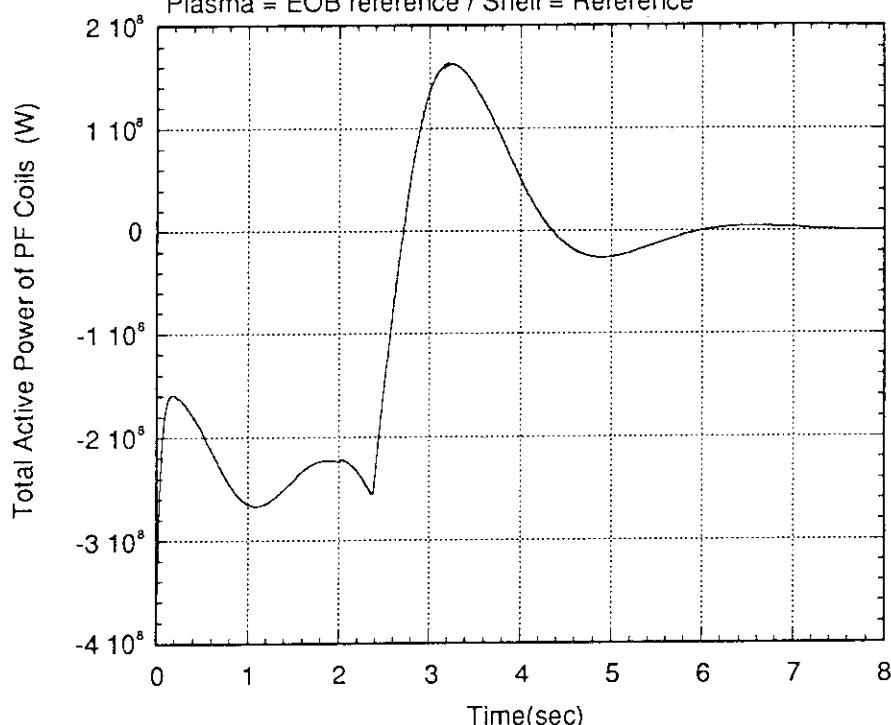


図A-3 図3-7のシミュレーションに於けるギャップ4, 5, 6の時間発展

Total active powers of PF coils in $\delta\beta_p = -0.2$ without limitation on $|dV_{coil}/dt|$

Deformable model / Feedback control plasma current center

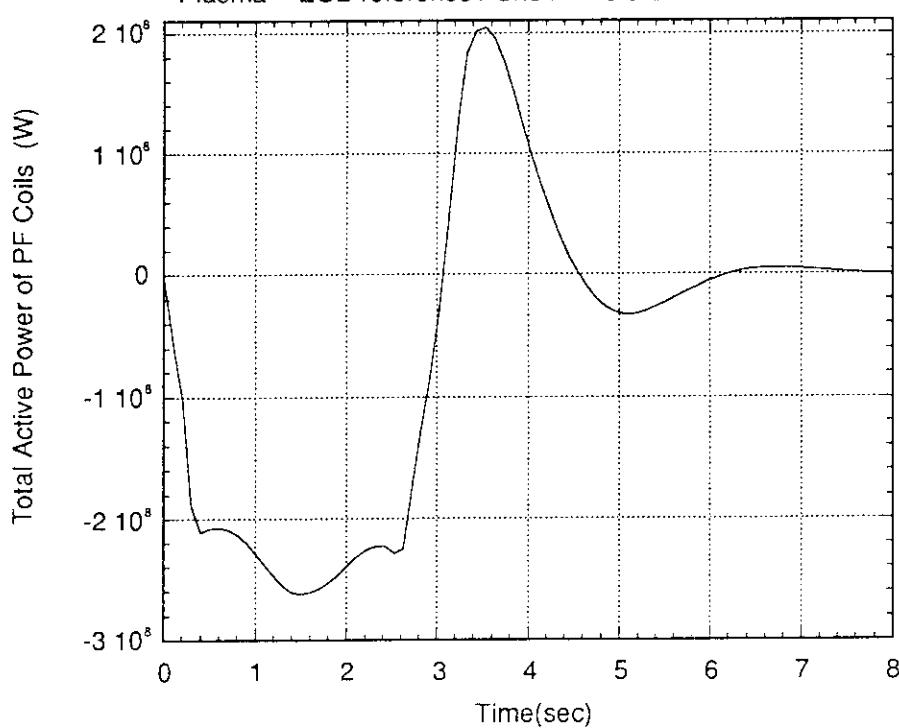
Plasma = EOB reference / Shell = Reference



図A-4 PFコイル全有効電力の時間変化（電圧時間変化の制限なし）

Total active power of PF coils in $\delta\beta_p = -0.2$, $|dV_{coil}/dt| < 30V/sec$

Deformable model / Feedback control plasma current center
Plasma = EOB reference / Shell = Reference



図A-5 PFコイル全有効電力の時間変化（電圧時間変化の制限あり）