特集・核 融 合

U.D.C. [533. 95:621.039.637.026].001.573:681.322.06

プラズマ挙動と装置に及ぼす電磁相互作用の分析

Analysis of Plasma Behavior and Electro-Magnetic Interaction between Plasma and Device

プラズマ挙動とポロイダル磁場コイル系や装置本体の電磁的挙動とは、強い相互 作用がある。日立製作所では各機器の電磁力解析や制御技術の開発のために、プラ ズマ自体の挙動及びプラズマ-装置間の電磁相互作用を統一的に解析する、プラズマ 制御動特性シミュレーションプログラムを開発した。本プログラムは、プラズマ挙 動を解析する部分及び電気回路の構成要素間の電磁相互作用を解析する部分から構 成されている。本プログラムを用いて"JT-60"のプラズマ電流立上げ過程を解析 した。その結果,立上げ過程でのプラズマ副半径膨張とガス注入による電流分布制 御が、高温プラズマを得る有効な手段であること及び真空容器上のうず電流は、立 上げ初期にポロイダル磁場コイルによってプラズマ領域に生じさせる磁場の40%を しゃへいする効果をもっていること,の2点が判明した。

小林朋文*

Tomofumi Kobayashi

45

言 1 緒

核融合炉に最も近い位置にあると目されているトカマク型装 置は,大型化の道を歩んでいる。日本原子力研究所で建設段 必要である。 本論文では、この目的に沿ったモデルを開発し、それをプ 階にある"JT-60"のような大型装置の特徴は、(1)高温(数 ログラム化して、プラズマ挙動シミュレーションに活用した キロ エレクトロンボルト)・大電流(数百万アンペア)のプラ ズマを閉じ込めること、(2)放電時間が長いこと(数秒)、の2 ので、その内容について紹介する。 点である。このため、 プラズマの挙動が装置に与える電磁 2 計算モデル 的,機械的影響が大きく,また長い放電期間中にプラズマが 壁に接触してつぶれるのを防ぐためにも、 プラズマの挙動を十 プラズマの電気抵抗や内部インダクタンスは,変流器コイル 電流やプラズマ電流の時間変化に強い影響を与える。逆に, 分理解して、それをうまく制御する技術開発が必要である。 プラズマ電流の時間変化は,各時刻でのジュール加熱量を決 プラズマ挙動を特徴づけるものは、 プラズマ密度、電子温 度,イオン温度,電流分布及びプラズマ位置の時間変化であ め、プラズマの温度分布や電流分布を決める。プラズマの温 度が電気抵抗を、電流分布がインダクタンスを決める。ま る。プラズマの挙動と装置本体やポロイダル磁場コイル系の た、プラズマのインダクタンスは、プラズマの平衡に必要な 電磁的挙動とは, 強い相互作用をもっている。したがって, 装置本体を構成している各機器(真空容器,架台,トロイダ 磁場(平衡磁場)の分布や大きさに影響を与え,平衡磁場を発 生するポロイダル磁場コイル電流値を決めるひとつの因子に ル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルなど)の設計のための 電磁力解析,コイル電源容量の評価,制御技術の開発などの もなる。 プラズマ電流の時間変化を既知関数として与え、プラズマ ために、 プラズマ挙動及びプラズマ-装置間の電磁相互作用 の輸送現象を解析するモデルは、Mercier²⁾や Düchs³⁾らによ とを統一的に解析する、 プラズマ制御動特性シミュレーショ って開発されたものがある。このモデルは、プラズマの平衡 ンプログラムを開発することにした。 位置の影響やプラズマと装置との電磁相互作用を無視してい プラズマの制御動特性を解析する方法として,従来は,プ る。したがって、 プラズマ電流波形が実験データとして得ら ラズマ及び装置構成要素を集中定数系の電気回路で表現した れる場合に、 プラズマ輸送現象を解明するのには有用である モデル"を用いていた。プラズマを集中定数系の電気回路で が、 プラズマの制御動特性を解析したり、 プラズマ挙動が装 表現する場合, プラズマの内部インダクタンスや電気抵抗が 置に及ぼす影響を解析することはできない。そこで日立製作 問題になる。内部インダクタンスは、プラズマ内を流れるト 所では、プラズマ挙動を解析する部分(プラズマ系)と、プラ ロイダル方向の電流分布によって決まる量であり, 電気抵抗 はプラズマの温度によって1,000~10,000倍変化する量であ ズマ-装置間の電磁相互作用を解析する部分(回路系)とで構 成したプラズマ制御動特性シミュレーションプログラムを開 る。したがって、プラズマを電気回路で表現する場合には、 発した。その構成を図1に示す。プラズマ系と回路系を結び 内部インダクタンスや電気抵抗を既知関数として与えざるを 付けるパラメータは、プラズマの電気抵抗、内部インダクタ 得ない。しかし、プラズマの内部インダクタンスや電気抵抗 ンス及びプラズマ電流である。プラズマの電気抵抗と内部イ を決める電流分布や温度分布は, 電気回路で表現したモデル ンダクタンスはプラズマ系から回路系に引き渡すパラメータ の解であるプラズマ電流に強く依存しており、あらかじめ与 であり, 逆にプラズマ電流は回路系からプラズマ系に引き渡 える場合には誤差が大きくなる。したがって、この問題を克 服するためには、プラズマの輸送現象(プラズマ系)及びプラ すパラメータである。 プラズマの輸送現象は,非線形性の強い系になっている。 ズマ-装置間の電磁相互作用(回路系)を同時に解析し,かつ

プラズマ系と回路系との相互作用を考慮した新しいモデルが

日立製作所エネルギー研究所

360 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)



図 - プラズマ制御動特性シミュレーションプログラムの構成図 プラズマ系から回路系に引き渡すデータは、プラズマの電気抵抗及び内部インダ クタンスである。回路系からプラズマ系に引き渡すデータはプラズマ電流である。

すなわち、プラズマの密度や温度を決める輸送係数が、密度 マ系の熱入力となるジュール加熱項を決めなければたらない。

や温度に依存している。また、プラズマ系と回路系との結合 も非線形である。非線形性の強い系の動特性を数値解析する ためには、特別な数値解法が必要である。非線形性を考慮 し、かつ安定な数値解を得るために、時間ステップを止めて 輸送係数やプラズマの電気抵抗が一定になるまで収束計算を 行なわせ、その後、時間ステップを進めるという手法を用い た。以下に、シミュレーションの内容についてやや詳しく述 べる。

2.1 プラズマ系

46

プラズマの輸送現象及び電磁的特性を解析するために、プ ラズマの粒子密度分布、電子とイオンの温度分布及び電流密 度分布の時空間変化を記述する方程式を連立させた。r方向 (プラズマ副半径方向)1次元円柱のプラズマを考え、プラズ マの電磁的特性を解析できるモデルを作った。

プラズマ密度分布の時間変化は、粒子拡散及びプラズマ粒 子同志の再結合による減少分と、イオン化によって中性粒子 がプラズマ粒子に変換されることによる増加分とのバランス によって決めた。

電子温度は、電子のエネルギーバランスによって決まる。 電子エネルギーの増加は、ジュール加熱項及び第2段加熱項 である。電子エネルギーが散逸する現象として、熱伝導、粒 子の対流による熱散逸、イオンとの衝突による電子からイオ ンへのエネルギー伝達、エネルギー損失を伴う原子過程など を考慮した。

イオン温度分布は、イオンに関するエネルギー収支によっ て決まる。イオンに対するエネルギー入力は、電子とイオン の衝突による電子からの伝搬エネルギーだけである。イオン プラズマ内の電気伝導率は温度の関数として与えることがで きるため、電流密度を与える方程式を連立させる必要があり、 Maxwellの電磁方程式から得られる電流密度の拡散方程式を 連立させた。これによって、回路系の解であるプラズマ電流 が与えられれば、粒子密度分布、電子とイオンの温度分布、 及び電流密度分布の時空間変化をそれぞれ解析できる方程式 系が得られた。これらの物理量から、プラズマの電磁的特性 を表わす電気抵抗や内部インダクタンスが導出できる。した がって、プラズマ挙動とプラズマの電磁的特性を、一貫性を 保ちながら解析できるモデルが構成できたことになる。

2.2 回路系

プラズマと装置との電磁相互作用を解析するモデルは、プ ラズマと装置を構成する各機器(変流器コイル,垂直磁場コ イル,四重極磁場コイル,真空容器など。)を電気回路として 表現したものである。電気回路の動特性は回路方程式を解く ことによって得られる。回路方程式を構成する場合,二つの 問題点がある。一つは、 プラズマの内部状態によって変化す る電気抵抗や内部インダクタンスの取扱い方であり、他の一 つは、電流径路が一定でないうず電流の取扱い方である。前 者については、2.1で論じたプラズマ諸量-粒子密度分布、電 子及びイオン温度分布ーに関する方程式を解くモデルと結合 することにより解決した。後者については、2次元導体上の うず電流挙動を解析するモデル4)を用いることで解決した。す なわち、 導体上に誘起するうず電流の時空間変化を解析し, 各時刻で集中定数として算出するうず電流のインダクタンス や電気抵抗を用いる。特に、真空容器はプラズマに近接した 導体であるため、 プラズマ挙動に与える影響が大きい。この たみ 古空空明しい

ほおおやり こうず電法は二つの成分に

十別

エネルギーの散逸現象としては、熱伝導、イオンの対流によ	ため、具空谷畚上に誘起されるフタ电流は二つの成分に入別
る熱散逸、及びイオンと中性粒子間で起こる荷電交換による	する。すなわち, トーラス方向に一様な軸対称成分と分布を
エネルギー散逸を考慮した。	もつ成分(くら形成分と名付ける。これは、真空容器を構成
以上, 粒子バランス, 電子及びイオンに関するエネルギー	しているベローズ部の間で還流する,うず電流成分である。)
バランスの式を連立させた。プラズマの密度分布,電子及び	とである。更に、軸対称成分はポロイダル方向の分布にフー
イオンの温度分布の時空間変化を解析するためには、プラズ	リェ分解し、一様成分、二重極成分及び四重極成分に分解す

る。うず電流成分を以上述べた四つの成分に分解し,それぞ れに関する集中定数を用いた。

プラズマ位置及び断面形状の制御性の解析のため、プラズ マの位置及び断面形状を記述する方程式をモデルの中に繰り 込んだ。プラズマの位置及び断面形状は、プラズマの状態と プラズマ領域に発生する磁場によって決定される。プラズマの 状態は、プラズマ系の解である物理量によって記述できる。 プラズマ領域に発生する磁場の強さと分布は、装置を構成す る各機器に流れる一次結合で表現した。したがって、各時刻 での磁場の強さとつり合うプラズマの位置は、Mukhavatov⁵⁾ の平衡式を解くことによって求めた。同様に、プラズマ断面 形状の長円変形度と磁場の分布の関係式⁶⁾を用いることによ って、長円変形度を数値的に求めた。

3 解析例

大型装置でのプラズマ電流立上げ過程で特に問題になるの は、電流分布制御,密度分布制御及び位置制御である。立上 げ過程での電流分布がジュール加熱効率を決め、高温状態で は電流分布は変化しにくいため、高温状態の電流分布を決め てしまう。このため、プラズマ電流の立上げに同期した、プ ラズマ領域の拡大による電流分布制御が考えられている。そ の手段として、"JT-60"では可動リミッタが設計されてい る。また、高密度プラズマ実現のためには、立上げ途中での ガス注入が考えられている。 によるプラズマ副半径膨張と、ガス注入によって得られるプ ラズマ性能,真空容器上のうず電流がプラズマ平衡に及ぼす 影響などを定量的に把握することである。

図2に、変流器コイルの初期励磁電流を95kA、一周電圧 調整用抵抗を0.1Ωとして解析した結果を示した。0.08秒で プラズマ電流は2.0MAまで立ち上がった。この時点で、プラ ズマ電流を更に立ち上げるため, 変流器によってプラズマ領 域に2段目の大きな誘導電圧を発生させた結果, 0.1秒でプ ラズマ電流は2.6MAまで立ち上がった。これは、"JT-60" で考えられている最も早い立上げ過程に対応している。図3 は、図2に示したプラズマ電流変化の場合の、プラズマの平 均密度 \bar{n}_e , 平均電子温度 \overline{T}_e 及び平均イオン温度 \overline{T}_i の時間変 化を示した。密度換算で10¹⁹/m³に対応するガス量を初期に 注入し、20msからガス注入することにより、3.9×10¹⁹/m³の プラズマが得られた。0.1秒では、 \overline{T}_e 1.1keV、 \overline{T}_i 0.9keVと なり, ジュール加熱だけで高温のプラズマが得られており, 可動リミッタによるプラズマ副半径膨張が有効であることが分 かる。図4は、真空容器上に誘起されるうず電流各成分の時 間変化を示した。一様成分Iuoは8msで168kA,二重極成分 I_{u_1} は5msで17kA,四重極成分 I_{u_2} は15msで17kAとそれぞ れ最大値に達する。くら形成分 Iusad は 6 ms で最小値-15kA になり、44msで最大値27kAに達する。プラズマ電流立上げ 途中でプラズマに大きな誘導電圧をかける0.08秒以降では, $I_{u0} \cancel{5}96 \text{ ms} \overrightarrow{C} 27 \text{ kA}, I_{u1} \cancel{5}86 \text{ ms} \overrightarrow{C} 15 \text{ kA}, I_{u2} \cancel{5}88 \text{ ms} \overrightarrow{C} 11 \text{ kA}$ とそれぞれ最大値に達し、一様成分は放電初期に比べ きしか 誘起されない。プラズマ電流立上げ過程で真空容器に誘起さ れるうず電流成分のうち,一様成分が最も強く誘起され,次

プラズマ制御動特性シミュレーションプログラムを用いて, "JT-60"を対象にプラズマ電流立上げ過程を解析した。解 析の目的は、プラズマ電流の立上げに同期した可動リミッタ







47

図2 プラズマ電流 *I_p*, 変流器コイル電流 *I_f*の時間変化 変流器 コイルの初期励磁電流は95kAである。0.08秒でプラズマ電流は2.0MAまで立 ち上がっている。この時点で変流器からの誘導電圧を大きくした結果, 0.01秒 でプラズマ電流は2.6MAまで立ち上がった。 図3 平均密度 \bar{n}_e , 平均電子温度 \bar{T}_e , 及び平均イオン温度 \bar{T}_i の時間変化 初期注入ガスによるプラズマ密度への影響は10msまでであり、 20 ms からはプラズマの立上りに同期させたガス注入の影響である。 362 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)



図4 真空容器上に誘起されるうず電流各成分の時間変化 (*Iuo*:一様成分, *Iui*:二重極成分, *Iu2*:四重極成分, *Iusad*:くら形成分)真空 容器に誘起されるうず電流は,一様成分が最も大きく,次いでくら形成分が大 きい。 図5 各回路要素に流れる電流が作る磁場が平衡磁場に占める割 合(*Iv*:垂直磁場コイル, *Iuo*:真空容器上の一様電流成分, *Iusad*: 真空容器上のくら形電流成分) プラズマ電流立上げ初期では,真空容 器に誘起されるうず電流の磁場に対するしゃへい効果によって,垂直磁場コイ ルは平衡磁場の1.7倍大きい磁場を発生しなければならないことが分かる。

いでベローズ部間で還流するくら形成分が大きいことが分か る。図5は、真空容器上のうず電流がプラズマの平衡に及ぼ す影響,すなわち,各回路要素に流れる電流による磁場が, 平衡磁場(プラズマを3mに保持するために必要な磁場)に占 める割合を示したものである。放電初期には、真空容器上の うず電流による磁場のしゃへい効果(特に,一様成分の効果) が大きく,直接電流制御が可能な垂直磁場コイルには,必 要な平衡磁場の1.7 倍の磁場を発生する電流を流す必要があ る。したがって、真空容器は、垂直磁場コイルによってプラ ズマ領域に発生する磁場の40%をしゃへいしている。プラズ マ電流立ち上げ途中でプラズマに大きな誘導電圧をかける0.08 秒(図2参照)以降では、真空容器上のうず電流が平衡磁場に 及ぼす影響は3%以下である。これは、プラズマの温度が初 期に比べ0.08秒では \overline{T}_e , \overline{T}_i がそれぞれ1.0keV, 0.8keV(図 3参照)と高温になっているためである。すなわち、プラズ マは高温になるほど電気抵抗が小さくなり、プラズマに電流 が流れやすくなる結果,真空容器にはうず電流が誘起されに くくなる。プラズマの電気抵抗は、放電初期に比べ0.08秒で は3桁小さくなっている。

ラムを開発し、本プログラムを用いて、"JT-60"のプラズ マ電流立上げ過程を解析した。その結果、プラズマ電流立上 げ過程でのプラズマ副半径膨張とガス注入による電流分布制 御が、高温・高密度のプラズマを得るのに有効な手段である こと、及び真空容器上のうず電流がプラズマの平衡に重要な 影響を及ぼす効果をもっていること、の2点が判明した。

最後に, プラズマ挙動のモデル作製には, 日本原子力研究 所の田島輝彦工学博士に負うところが大きく, 厚くお礼を申 し上げる次第である。

参考文献

- 1) 鈴木, 外:トカマク回路論, JAERI-M 6531 (1976-5)
- 2) C. Mercier, Soubbaramayer : Plasma Build up by a Moving Limiter, EVR-CEA-FC-742 (1974-5)
- 3) P. H. Rutherford, D. F. Düchs : A Computer Model of Radial Transport in Tokamaks, MATT-1272 (1976-8)
 4) T. Kobayashi : Analysis of Eddy Currents Induced in the Vacuum Vessel of a Tokamak Device, Japan. J. appl. 18, 2003~2009 (Oct. 1979)

4 結 言

48

プラズマ挙動及びプラズマ-装置間の電磁相互作用を統一 的に解析する、プラズマ制御動特性シミュレーションプログ 5) V. S. Mukhovatov, V. D. Shafranov : Plasma Equilibrium in a Tokamak, Nucl. Fusion 11, 605~633 (1971)
6) J. M. Greene, J. L. Johnson et al. : Tokamak Equilibrium, Phys. Fluids 14, 671~683 (Mar. 1971)