U.D.C. 621.039.672.026:533.9: [681.532.8'135.4'137:681.323]

特集・核 融 合

# トカマク型核融合装置 "JFT-2" プラズマ制御 システムの開発

## Development of the "JFT-2" Tokamak Plasma Position Control System

世界の核融合研究の中心となっているトカマク装置では、プラズマ位置の制御技 術は同装置開発上の最重要課題の一つであり、各国で開発が進められている。

しかし、従来の制御方式はいずれもアナログ制御技術を軸としたものであり、プ ラズマの急激な変化に十分追従する上で難点があった。そこで最新のディジタル制 御技術を用いて、制御の高速化、高精度化を図り、更に高度の予測、学習制御技術 を導入してプラズマ制御性能の向上を図ることとした。この目的のため、プラズマ 位置検出,制御演算及び電源制御を、すべて最新の制御用計算機を用いて実行する 方式を開発し、日本原子力研究所で稼動中のトカマク型実験装置"JFT-2"に適 用し,所期の結果を得た。

本論文では、上記開発で実施された"JFT-2"のシステム構成での本体、電源 部分の改造と、プラズマ位置制御システム開発上の技術課題、及びプラズマ位置フ ィードバック制御効果の検証結果について述べる。

藤 沢 👘	登*	Noboru Fujisawa
松崎	誼**	Yoshimi Matsuzaki
鈴木紀	男**	Norio Suzuki
村井勝	ンム*** /ロ	Katsuji Murai
鈴木	矢口****	Satoshi Suzuki
宮原養治	侶***	Yôjirô Miyahara
射場大	造***	Daizô Iba
古関庄一月	<b>郎<sup>*****</sup></b>	Shôichirô Koseki

言

世界での最近の核融合研究は, ソビエト連邦で開発された トカマク型装置を中心に急速な発展を遂げつつある。トカマ ク型実験装置 "JFT-2" (JAERI Fusion Torus 2)は, 国 家プロジェクトとして推進され、日本原子力研究所が中心に なり、日立製作所が装置の製作を担当して昭和47年4月に完 成し,所期の研究成果を収めた<sup>1)</sup>。

本成果を基礎に、次期の臨界プラズマ試験装置"JT-60" が計画され、現在設計開発が進行中であるが、その有効な機 能発揮のためには,的確なプラズマ位置制御技術,追加加熱技 術の確立が不可欠となってきた。その目的に"JFT-2"の 改造が計画され,真空容器に加熱及び測定用ポートを増設す るとともに、アルミニウム製のシェルを取り除いて、大容量 サイリスタ電源及び制御用計算機から構成されるプラズマ位 置制御装置を新設して、このほど完成をみた<sup>2)</sup>。

プラズマ位置制御は、これまで国内外のトカマク装置で行 なわれ、多くの成果を収めている<sup>3)~6)</sup>。しかし、プラズマ位 置演算と設定値演算に制御用計算機を導入している以外は, 在来のアナログ制御技術を適用したものであり, プラズマの 急激な変化に十分に対応することは困難であり、最新のディ ジタル制御技術を駆使して、制御の高速化と高精度化、機能 の向上を図ることが不可欠となった。そのため、"JFT-2" では、位置検出、制御演算及びサイリスタ電源制御をすべて 最新の制御用計算機を用いて行なう方式を開発し,所期の結 果を得ることができた。以下, "JFT-2"のシステム構成と プラズマ位置制御システムについて述べる。

#### 本体構成及び電源構成 2

2.1 本体構成



No.	名 称	No.	名 称
1	真空容器	8	下部ベース
2	トロイダル磁場コイル	9	冷却水配管
3	直流垂直磁場コイル	(10)	変流器鉄心
(4)	巻戻しコイル		架台
(5)	パルス形及び制御用垂直磁場コイル	(12)	巻戻し線
6	水平磁場コイル	(3)	バイアスコイル
1	上部ベース	(14)	変流器コイル

- "JFT-2"の本体装置構成図を図1に、本体主要諸元を表 1に示す。本体の詳細については、既報<sup>1</sup>に詳しく報告され

"JFT-2"本体装置の構成を示す縦断面図であ 本体装置構成図 × | り, No.①, ⑤及び⑫を新製し, その他は既設品を流用又は改造の上使用して いる。

25

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部 工学博士 \*\* 日本原子力研究所東海研究所核融合研究部 \*\*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\*\*\* 日立製作所日立工場 工学博士 \*\*\*\* 日立製作所日立工場

#### 340 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)

表 | 本体主要諸元 "JFT-2"の本体を構成するコンポーネントの主要諸元を示す。

機	器	項	目	仕	様	
真 空 ベローズ		形 ベーキング温度 平 均 曲 率 半 径 内 径		円 環 状 100~350°C 900 mm 620 mm		
容 器	厚肉リング	形	状	円管	奇 殼	
	全 体	大 周 方 リ ー ク	向抵抗 7 総量	2 mΩ(750°C)以上 I×10 <sup>-7</sup> Torr·l/s以下		
変	流器	鉄 心 み 巻 一 次 巻 一 次 考 直 流 バ 電 源 コン	断 面 線 巻 数 電 ス ア ス ・ デンサ	0.58V-S 180T 5,000A最大 16T×100A 525kJ		
トロイ	ダルコイル	コ イ ル 通 電 最大許容	✓ 個 数 時 間 ⊮ 起 磁 力	4 フラットトップ0. s 7.  × 0 <sup>3</sup> kAT		
水平磁	場コイル	通 電 最 大 起	時 間 2 磁 力	0.2 s 6 kAT		
直流 垂直磁場コイル		通 電 最 大 起	時 間 2 磁 力	フラットトップ3s 50kAT/コイル		
パルス	全 体	最大起	2 磁 力	I40 KAT		
及び制 御用垂 直磁場 コイル	パルス形	通 電 最大	時 電 流	0.02 s 8,750 A		
	制御用	通 電 最大	時 電 流	0.2 s 2,500 A		

ているので、ここでは最近改造した主な部分について述べる。(1) 真空容器

真空容器の外観を図2に示す。真空容器は、プラズマの閉



図3 プラズマ制御用垂直磁場波形図 直流垂直磁場コイル,パル ス及び制御用垂直磁場コイルを用いたプラズマ制御用垂直磁場波形を示す。



じ込め空間を形成するトーラス状の中空円環形状を成し、 大周方向に2分割して分割部をリップ形状とし、シール溶 接した。真空容器は、変流器の二次1ターン回路となるた め、この回路抵抗をプラズマの抵抗に比べて大きい値とし、 100~350°Cのベーキングに耐える必要がある。そのため、成 形ベローズ構造を採用し、平面形状が扇形のベローズ片と厚 肉リング片をそれぞれ14片ずつ大周方向に交互に溶接するこ とにより組み合わせ、円環状に構成した。厚肉リング部分に は、上向き、下向き及び水平の各ポートを取り付けている。 これらポートの総数は40個に及び、更に各ポートに設けられ た孫ポートの数は64個に達し、中性粒子入射加熱、高周波加 熱、真空排気・ガス導入、プラズマ診断など、多様な用途に 供される。

(2) パルス及び制御用垂直磁場コイル

このコイルは、トロイダル磁場コイル内径内を、トーラス 方向にくぐり抜けて環状に構成し、トーラス内周側上下及び



図4 電源構成図 "JFT-2"電源システムの単線結線図を示す。トロ イダル磁場コイル電源は直流発電機, 垂直磁場コイルと水平磁場コイル電源は サイリスタ電源により構成されている。

トーラス外周側上下にそれぞれ一組みずつ配置した。

パルス垂直磁場コイルと制御用垂直磁場コイルは共用して おり,図3に示すように、プラズマの発生初期にコンデンサ の急放電によりパルス磁場 Bvpを発生させて、直流磁場 Bvdを 打ち消し、プラズマ電流 Ipがフラットトップに達した後は、サ イリスタ電源により制御用垂直磁場 Bvcを発生させて、合成 された垂直磁場 Bvによりプラズマの位置を制御している。

#### 2.2 電源構成

図4に各コイルに通電するための電源構成を示す。これらの電源は、前図3に示すようにプラズマ電流Ipに対応して運転される。そのうち、特にプラズマ電流制御に重要な役割を 果たす制御用垂直磁場コイル電源は、次の点を考慮して製作した。

すなわち,高速制御を行なうため12相整流とし,負荷に直列 抵抗を入れてコイル時定数を短縮できるようにした。また,運 転条件によって交流電圧を変えられるように,変圧器にはタッ プを設け低負荷時は電圧を下げて点弧角を進め,電流リップ ルを減らせるようにするとともに,サイリスタ電源としては 負荷コイルから発生するスパイク電圧,及びパルス垂直磁場 コイル電源から印加される電圧に対し十分耐えられる構造と した。

図2 真空容器の外観図 "JFT-2"の真空容器外観を示す。ベローズ と厚肉リングとを交互に配置し、それぞれの厚肉リングに上向き、下向き及び トーラス外周(水平)向きの各ポートを取り付けている。

26



図5 プラズマ位置制御システム構成 プラズマ位置制御のシステム構成を示す。プラズマ位置演算を行なう日立制御用計算機(HIDIC 80)とサイリスタ直接ディジタル制御を行なう日立マイクロコンピュータ(HIDIC 08E)を中心に構成している。

3 プラズマ位置制御システム

任意に選択できること。

(4) サイリスタのディジタル位相制御回路,コイル電流,電 圧の高速AI(高速平均値検出回路)を採用していること。
(5) 過電流,サイリスタ素子故障(Break Down, Break Over)などの故障診断機能の充実を図っていること。

ここでは、サイリスタ電源制御装置のDDC方式を中心に、 ハードウェア構成、ソフトウェア構成及びプレプログラム制 御について述べる。

#### 3.2.1 ハードウェア構成

図6に、16ビット日立マイクロコンピュータ"HIDIC 08E" を中枢としたDDC装置のハードウェア構成を示す。この装 置は、CPU(中央処理装置)、メモリのほか、ダイレクトタ スク起動用割込入力装置、CPUで計算された制御角指令を もとに、定められた位相でパルスを発生するディジタルパル ス移相器、電源相数のリップルを含んだサイリスタ変換器の 出力電流、電圧の平均値を高速で検出する高速AI、ディジ タル入出力装置などで構成される。これらの入出力装置はい ずれもメモリインタフェースとし、高速処理ができるように している。

#### 3.2.2 ソフトウェア構成

図7にソフトウェア構成を示す。サイリスタ電源を制御す るソフトウェアとしては、イニシャル処理、常時実行してい る故障診断処理及び制御サンプリング周期ごとに実行する電

"JFT-2"でのプラズマ位置制御システムの構成を図5に 示す。本システムでは、プラズマ位置制御に日立制御用計算機 "HIDIC 80"を,電源制御に日立マイクロコンピュータ"HIDIC 08E"を用いて全ディジタル化し、制御速度・制御精度の向 上,制御機能の高度化及び監視・故障診断の付与による信頼 性の向上を図っている。

#### 3.1 プラズマ位置制御方式

図5に示すように、プラズマ位置制御用計算機は、磁気プ ローブ、ロゴスキーコイルなどからの信号により、プラズマ の位置を計算する。プラズマ位置の目標値と検出したプラズ マ位置の偏差にPID(比例・積分・微分)演算を行なってコイ ル電流指令値を算出し、電源制御用マイクロコンピュータへ 出力する。マイクロコンピュータは、コイル電流指令値とコ イル電流帰還値の偏差が零になるようにサイリスタの位相制 御を行なう。プラズマ位置制御システムの実現に当たっては、 プラズマの挙動が非常に速いため高速制御が必要であり、高 速アナログ入力装置の採用、ソフト処理の高速化を行なった。 その結果、サンプリング周期1.67msの高速処理を実現してい る。また本システムでは、実験サポートシステムとして、実 験条件、制御パラメータの変更が容易に行なえるように、モ ニタ機能、オペレータリクエストなどのマンマシン機能及び ショット前チェック機能の充実を図っている。

#### 3.2 サイリスタ電源制御方式

従来,サイリスタ電源制御装置にはアナログ装置が用いられているが、"JFT-2"では制御応答の高速化,制御精度の向上,プレプログラム制御などの制御機能向上のために、マ イクロコンピュータを用いたDDC (Direct Digital Control) 方式を開発した。この装置の主な特長は、次に述べるとおり 流(電圧)制御処理の各タスクがある。電流制御系は高速応答



図 6 ハードウェア構成 マイクロコンピュータを用いた DDC 装置の ハードウェア構成を示す。



方式を開発した。この装置の主な特長は、次に述べるとおりである。
(1) 制御方式(電流制御,電圧制御)の選択ができること。
(2) 制御指令モードとして、制御用計算機からの指令のほか、外部関数発生器からの指令など、二つのモードが選択できること。
(3) プレプログラム制御により、コイル電流の立上げ時間を

図7 ソフトウェア構成 ソフトウェアで処理する各タスクのタスク構成を示す。

27

342 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)

が必要であり、ハードウェアの高速化とともに、ソフトウェ ア的にも、OS(Operating System)を介さないダイレクト タスク方式とした。図8に電流制御のフローチャートを示す。 電流制御では、リミッタ機能、零検出機能などをファームウ ェア化し、高速処理の実現を図っている。

3.2.3 プレプログラム制御

プラズマの電流立上げ時で、プラズマを速やかに正常位置 に移行させるために、プラズマ電流の立上げ特性に応じて、 コイル電流の立上げ時定数を任意に変更できることが必要で ある。このため、電流指令を任意に設定し、選択できるプレ プログラム制御を採用している。このプレプログラム制御は、 通電開始時点からコイル電流が設定値に達するまでの期間行 なわれ、その後、位置フィードバック制御に移行する。図9 はプレプログラム制御を行なったオシログラムであり、電流 フォーシングにより電流を急速に立ち上げた例を示す。

#### 4 実験結果

図10に、プラズマ位置制御システム(垂直磁場)によるプラ ズマ位置フィードバック制御を行なったときの実験結果の一例 を示す。プラズマパラメータが変化しても、垂直磁場 Bvcコ イル電流を増減し、プラズマ電流を約160msの間維持してお







図10 プラズマ位置制御の実験結果 プラズマパラメータが増減して も,垂直磁場 Bvcコイル電流を増減してプラズマ電流を維持し,プラズマ位置 制御が行なわれていることが分かる。

り、プラズマ位置のフィードバック制御が行なわれていることが分かる。

### 5 結 言

以上, "JFT-2"のシステム構成と最新のディジタル制御 技術を駆使したプラズマ位置制御システムについて述べた。 プラズマ制御技術は, 今後急成長が予想されるマイクロコン ピュータを軸とするエレクトロニクスデバイスの進歩により急 速に前進すると考えられる。その結果, 核融合装置の運転, 実験のための制御計測システムのディジタル化が進み, 機能 及び信頼性の向上並びに診断機能付加による保守性の向上が 期待される。

終わりに,本システムの開発に当たり御指導をいただいた 日本原子力研究所東海研究所核融合研究部及び同所大型トカ マク開発部の関係各位に対し深謝申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 加沢,外:中間ベータ値トーラス装置"JFT-2",日立評論, 55,107~112(昭48-2)
- Y. Matsuzaki, et al.: in Proc. of the 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research San Francisco, Nov. 1979
- 3) J. Hugill, A. Gibson: Nuclear Fusion 14 (1974) 611
- 4) J. L. Anderson, R. S. Booth, et al. : Nuclear Fusion
- 16 (1976) 629
- 5) R. Dei-Cas, J. Blum, et al.: in Proc. of the 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville, Oct. 1977
- 6) J. Fujita, et al.: in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th Int. Conf. Innsbruck 1978) N-2

28