

ステラレータ・トカマク型実験装置 “JIPPT-II”の完成

Stellarator and Tokamak Hybrid Apparatus “JIPPT-II”

日立製作所は、名古屋大学プラズマ研究所第2次計画の主装置である準定常プラズマ実験装置“JIPPT-II”の本体、垂直磁場コイル電源及び制御系などを完成した。

本装置は、第一線のトカマクとしてもステラレータとしても、運転可能な世界唯一のハイブリッド形装置であり、それだけ多くの新技術、高度の技術が必要となり採用された。特に、真空、ヘリカルコイル、トロイダル磁場コイル、プラズマ位置の帰還制御などの技術で画期的進歩があった。本論文では、その技術的問題の概要について述べる。

伊藤 智之*	Satoshi Itoh
東井 和夫*	Kazuo Tōi
松岡 啓介**	Keisuke Matsuoka
加沢 義彰***	Yoshiaki Kazawa
橋本 宏***	Hiroshi Hashimoto
鈴木 史男***	Fumio Suzuki
石川真佐男****	Masao Ishikawa

1 緒言

準定常プラズマ実験装置“JIPPT-II”は、名古屋大学プラズマ研究所第2次計画の主装置として昭和49年から建設に着手し、昭和51年に完成した。この装置は世界の第一線での実験が可能なることはもちろん、核融合プラズマの基礎研究を多角的に行なうことをねらい、トカマクとしてもステラレータとしても運転できる、複合磁場系のハイブリッド形トラスとされた。

本装置は構造は複雑であるが、実験装置として多くの特徴をもっている。まず、現在核融合の分野で最も研究が進んでいるトカマクプラズマに関する研究が可能であり、また、一方向(直流)のプラズマ電流が作るポロイダル磁場が不可欠のため、パルス状の出力しか得られないトカマクの欠点を、ステラレータではヘリカルコイルが作るポロイダル磁場によりカバーできる可能性があり、その特性を確認する実験が可能であり、更に、ヘリカルコイルによりトカマクプラズマの不安定性を抑制する実験なども可能である。

本装置はトカマクとしても、その規模、磁場や真空などの質で我が国のトップをゆくものであり、世界で初めてシェルレス(いわゆる導電性シェルのない)プラズマの位置制御に、フィードバック制御を採用し成功するなど、現在までに名古屋大学の研究陣により世界の動向をリードする多くの成果が得られている^{1)~4)}。すなわち、計算機を組み込んだ平衡磁場系のフィードバック制御の最適化により、プラズマを真空容器中央部に安定に保持し(±10mm以内)、プラズマ電流を増大させるとともに、放電時間を0.5秒まで延ばすことに成功した。フィードバック制御が行なわれない場合プラズマは不安定で、ヘリカルコイルのステンレス鋼製巻棒(抵抗性シェル)に磁場が浸透するスキントイム(約5ms)程度で壁に衝突し崩れてしまうことを考えると、このフィードバック制御による安定化の有効性が理解される。これ以前の世界のトカマクのほとんど大部分は、銅やアルミニウム製の導電シェルを用いることにより、長いスキントイムとした自己制御能に頼っており、一部帰還制御を適用した装置でも、数十ミリ秒のレスポンスでゆっくりした制御を行なうだけにとどまっていた。現状では、数値制御を適用した帰還制御がトカマク炉の本命となる方式として常識化したのが、当時としては画期的な方式であっ

た。本方式の採用により、プラズマの高密度放電で問題とされるディスラプティブ不安定性も十分に低く抑え得ることが示されたことも世界の核融合研究者を勇気づけた。

また、到達真空度 8×10^{-10} Torr という高真空条件を実現することにより、ほとんど放電洗浄を行なうことなく通常のトカマク特有の放電特性が得られ、他の手段とあいまってプラズマ電流 $I_p = 130$ kA の実験で、平均密度 $\bar{n}_e \approx 1 \times 10^{14}$ cm⁻³、電子温度 $T_{e0} \approx 900$ eV、イオン温度 $T_{i0} \approx 600$ eV、閉じ込め時間 $\tau_e \approx 15$ ms 及び実効荷電数 $Z_{eff} \approx 1.5$ という高性能プラズマが得られている。⁵⁾

一方、ステラレータとしては、基本寸法、トロイダル磁場、ヘリカル磁場の強さ、回転変換角などを総合的に勘案して、従来最大の規模を誇った西ドイツマックスプランク研究所の W-VII (ベンデルスタイン-7) をしのぐ。

ステラレータとしての運転研究は最近始まったばかりであるが、既にこれを裏付けるデータが得られており、今後の成果が期待される。本論文では、日立製作所が製作した本体、及び垂直磁場の励磁電源を含むフィードバック制御系に関する設計、製作上の技術的問題について述べる。

2 装置の概要

“JIPPT-II”本体の外観を図1に、その構成を図2に示す。すなわち、プラズマ閉じ込め空間である真空容器、主閉じ込め磁界を生成するヘリカルコイルとトロイダル磁場コイル、プラズマ電流を流すための変流器(鉄心、一次コイル、バイアスコイル及び磁気シールド板)、プラズマの平衡を保持するための垂直磁場コイル、水平磁場コイルなどから構成される。垂直磁場コイルは、運転制御の方法を考慮して、直流垂直磁場コイルとその巻戻しコイル、パルス形垂直磁場コイル及びフィードバック制御コイルの3種類のコイルに分割されている。主要パラメータを表1に示す。

3 真空容器

プラズマの温度、密度、閉じ込め時間などの性能は、容器の到達真空度と真空の質(不純物)に大きな影響を受ける。真空壁とガスケット材料の選定、溶接、表面処理を含む加工法

* 九州大学応用力学研究所 工学博士 ** 名古屋大学プラズマ研究所 工学博士 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所大みか工場

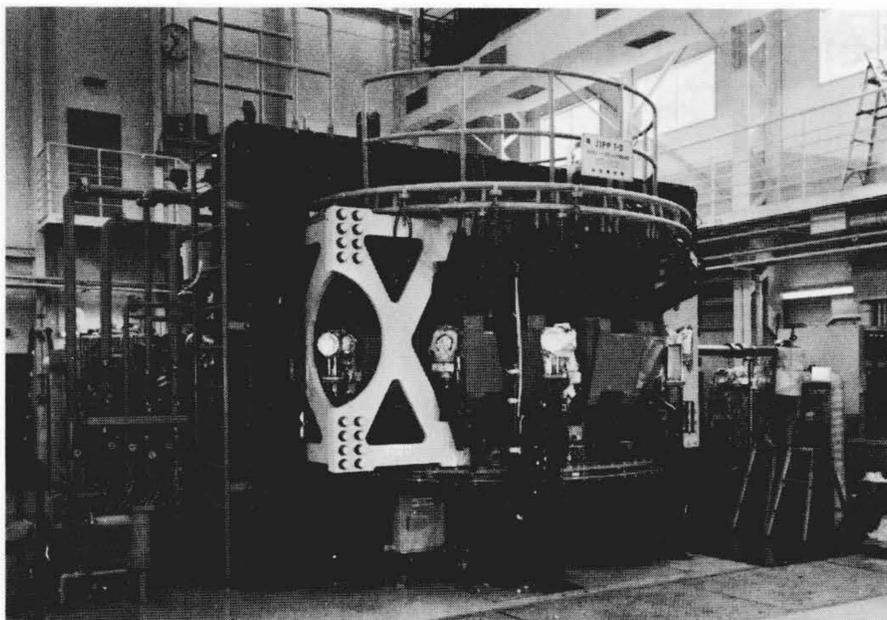


図1 “JIPPT-II”の外観 準定常プラズマ実験装置“JIPPT-II”本体部の外観を示す。

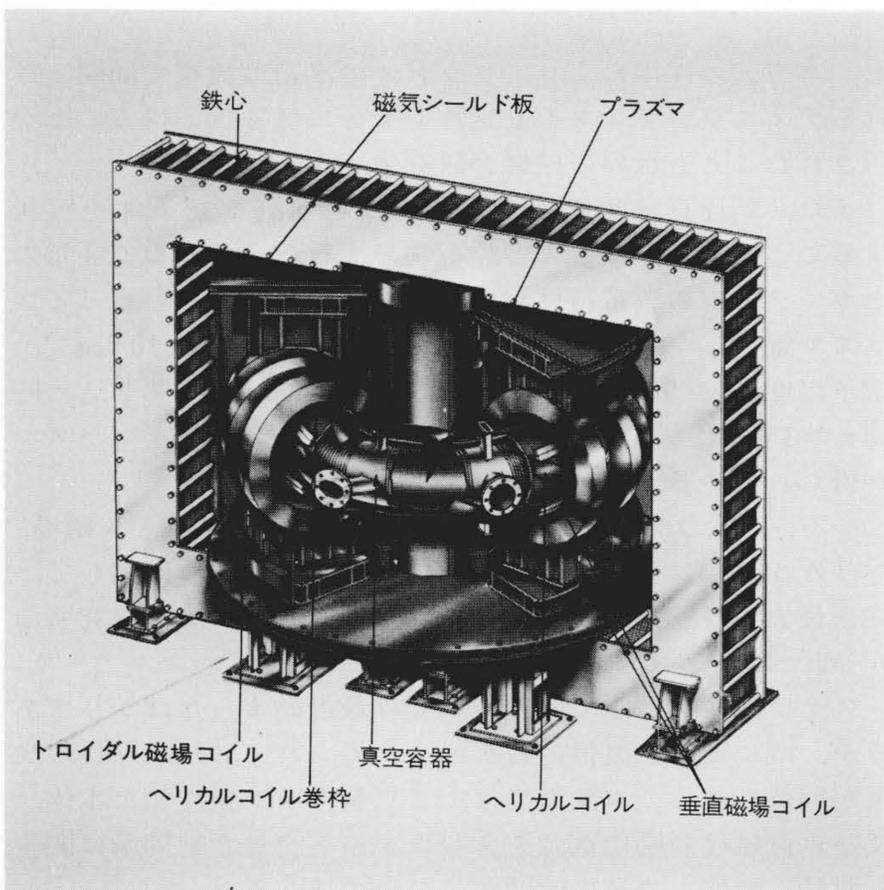


図2 “JIPPT-II”本体模式図 構成はトカマクと類似しているが、ステラレータとしても動作するのでヘリカルコイルをもっているのが大きな特徴である。

及び高温ベーキング、並びに放電洗浄などによるアウトガスの軽減が特に重要である。このため“JIPPT-II”では、容器本体部は薄肉ベローズセクタと厚肉リングの複合溶接構造とすることにより、ワンターン抵抗を確保してジュール加熱時真空容器壁に流れる電流を許容値以下に抑えるとともに、各種ポート類を含めて、フランジ部には我が国の核融合装置としては初めて全金属ガスケットシール構造を採用した。

円形フランジには、古くからコンフラット形などが用いられ一応の性能が得られているが、非円形フランジの高温、高真空メタルガスケットは難しく、最近まで実用に耐えるものは少なかった。日立製作所は設計過程で、アルミニウムフォイル、金シート、金属Oリングシールなど、それぞれの方式について多くのパラメータを変えた一連の各種開発試験を実施した。この結果、開発した銀めっき金属Oリングを選定し、NC(数値制御)工作機による超仕上を施して350°Cのベーキング温度で十分使用可能な長方形、菱形、大円形、その他特殊

表1 “JIPPT-II”装置のパラメータ “JIPPT-II”の主要パラメータを示す。

項目	定格数値
トーラス半径	$R=91\text{cm}$
プラズマ半径	$a_p=17\text{cm}$
トーラス磁場	$B_t=30\text{kG}$
ヘリカルコイル	極数 $l=2$, 周期数 $m=4$, 起磁力 $\approx 300\text{kAT/本} \times 4$ 本 回転変換角 $t_h \approx 0.3 \sim 0.1$
垂直磁場	$B_v=0.5\text{kG}$ (負帰還制御)
鉄心の磁束	$\Phi=0.57\text{V}\cdot\text{s}$ (バイアスなしの場合)
真空到達度	$1 \times 10^{-9}\text{Torr}$
コイル端励磁電力	
トロイダル磁場コイル	60MW
ヘリカルコイル	16MW
垂直磁場コイル	4 MW
水平磁場コイル	0.2MW
フラットトップ	0.5~1s
運転周期	5~1.5min

形状のフランジシール技術を成功させ、溶接、表面処理、組立などにきめ細かい各種の新技术を採用することにより、 10^{-10} Torr台の超高真空を得ることができた。図3に、その真空容器を示す。

4 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは20個のコイルユニットから成り、中空水冷導体で巻回されている。プラズマ中心で3 T、磁気エネルギー16MJであり、その規模は我が国で稼動しているもののなかでは最大である。したがって、励磁電流とトロイダル磁場及び垂直磁場との相互作用により、数万重量トンに及ぶ強大な電磁力が発生する。更に、パルス通電による温度上昇の影響で熱的荷重が重なり、これらの支持構造と強度解析が設計上重要である⁶⁾。コイルに加わる力は、トロイダル磁場による自己電磁力と垂直磁場による電磁力の二つに分けられる。このうち、自己電磁力 F_r はコイルの法線方向に作用し、その分布はトーラスの内側では大きく、外側では小さく、全体的にはフープ力のほか、トーラスの中心に向かう求心力が

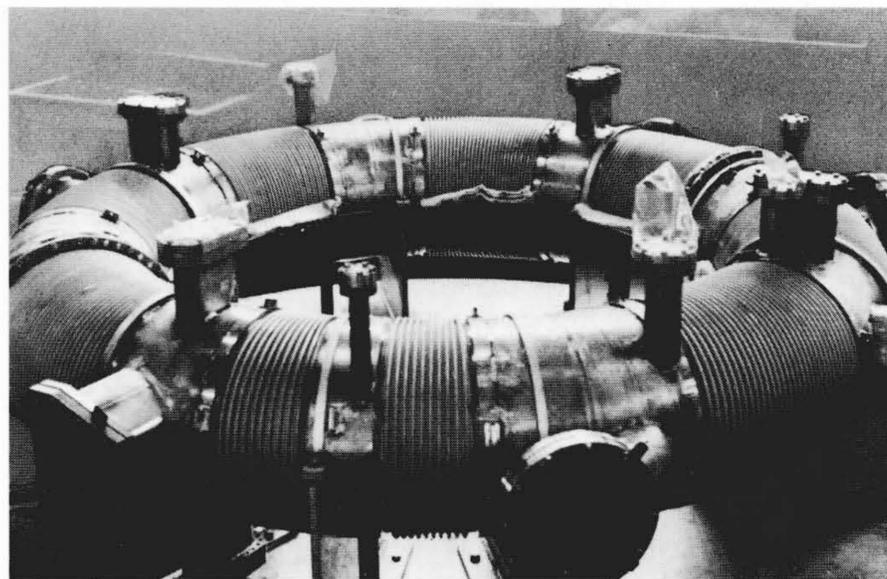


図3 真空容器 内径400mmのベローズと厚肉リングの複合構造であり、 10^{-9} Torrの超高真空を得るためにフランジ部はすべて金属ガスケットシールとし、全体が350°Cにベーキングされる。

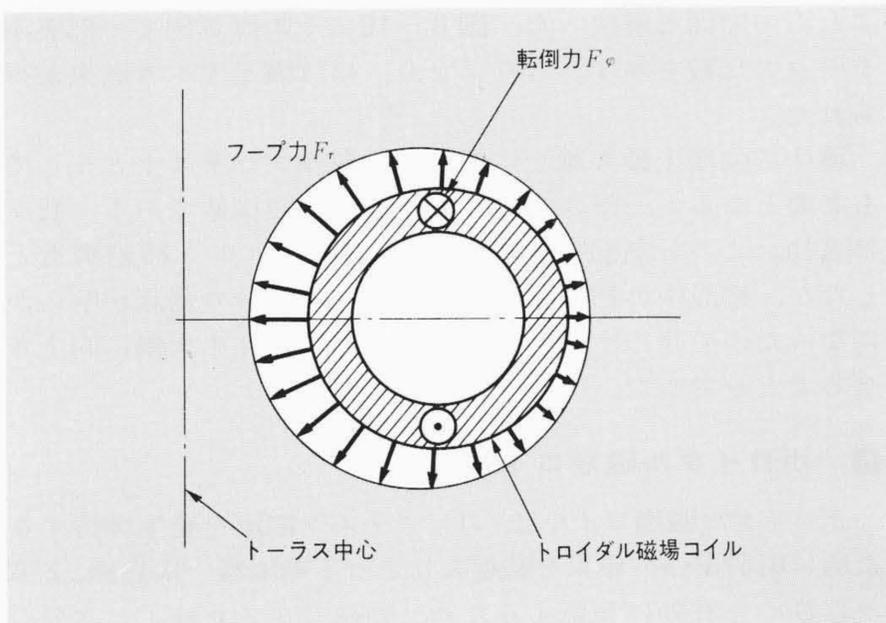


図4 トロイダル磁場コイルに作用する電磁力 トロイダル磁場コイルに作用する電磁力(フープ力 F_r , 転倒力 F_ϕ)の説明図である。

作用する。一方、垂直磁場による電磁力は、コイルに転倒力 F_ϕ として作用する(図4参照)。

自己電磁力に対する支持は、コイルの外周にリングサポートを設け、その支持脚により上下ベースに固定する方法を採用した。リングサポートの材質は、トーラスの外周側はSUS304とし空間が制限され、しかも大きな力を受けるトーラス中心側には、窒素を添加して高耐力としたYUS304N(新日本製鉄株式会社商品名)を採用し、両者を溶接により接合した。自己電磁力及び熱による応力分布を、有限要素法により計算した例を図5に示す。図6はリングサポートの応力計算結果と実測例である。

一方、転倒力に対しては、コイル及び上部ベースの回転を防ぐため、先の図1に示したように、上下ベース間のプラズマ計測などに使用しない変流器鉄心ヨーク部に、トラス構造の支持部材を設ける方式にした。この配置は初めての試みであり、合理的であるとして好評であった。転倒力による変位、応力などは、骨格構造モデルによる3次元トラスの有限要素

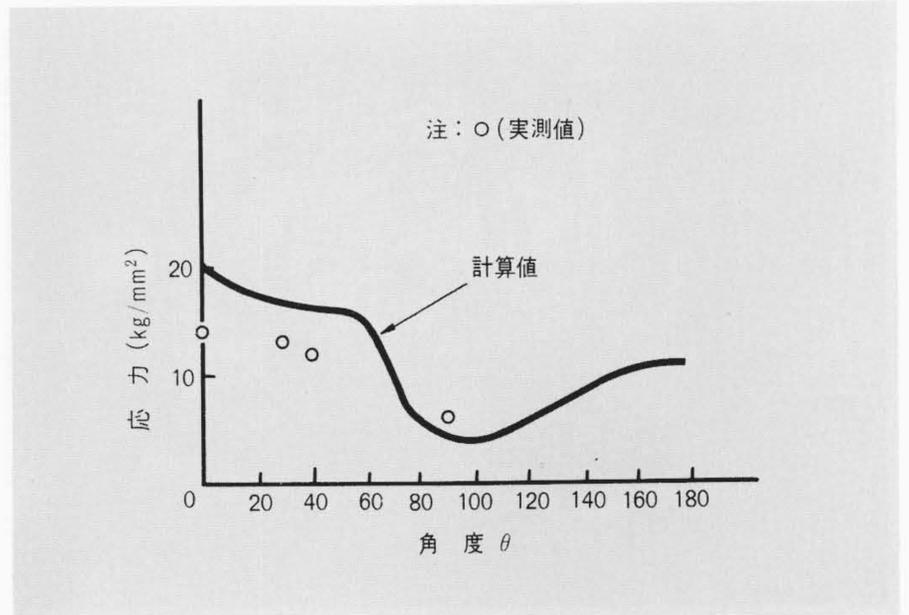


図6 リングサポートの応力分布 トロイダル磁場コイルのリングサポートの応力は、位置(角度 θ)により異なる。有限要素法による計算値とストレインゲージによる実測値の比較を示す。

法を用いて解析し、変位をトーラス中心半径上、トロイダル磁場コイル上端で2mm以下に抑えることを目標に設計した。トランシットを用いて実測されたこの点の変位は1.6mmであり、計算値の約130%であった。この差は、支持部材連結部のすきまの影響によるものと推定される。国外を含めて、従来トロイダル磁場コイルの強度解析の精度が悪く、変位などでは数倍の誤差が普通といわれていた点を考慮すると格段の進歩であり、これにより大形トロイダル磁場コイルの強度設計手法がほぼ確立された。

5 ヘリカルコイル

ヘリカルコイルは、図2, 7に示すようにトロイダル磁場コイルの内側で、しかも真空容器の外周に配置されたトラス状ステンレス鋼製円環巻棒上に巻回されている。この巻棒は35mmの板厚で、ヘリカルコイルの巻心及び真空容器の支持を行なう役割とともに、スキントイム5ms程度の抵抗性シェルとしても動作する。巻棒は、トーラス方向に電気的な1タ

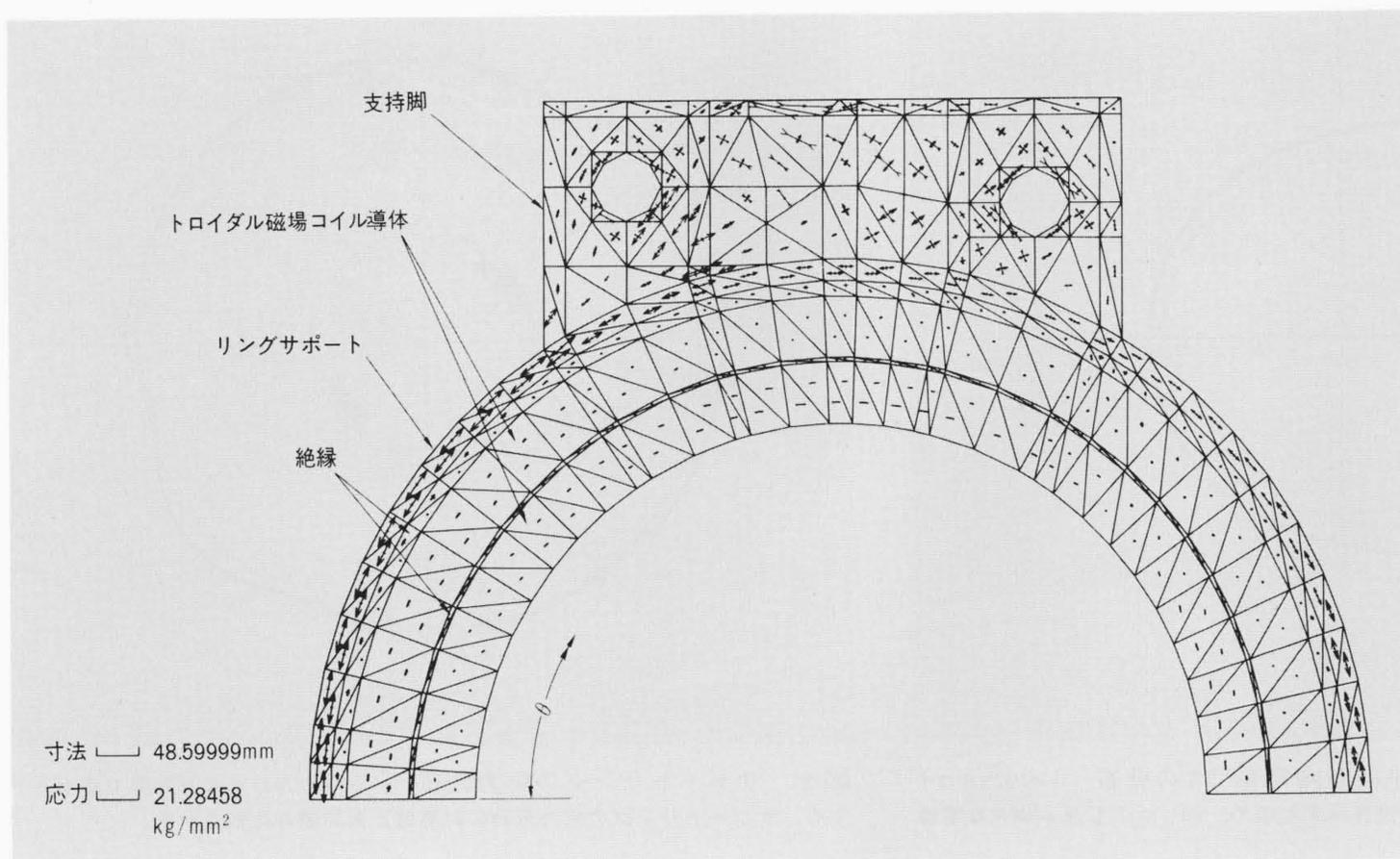


図5 トロイダル磁場コイル応力分布の計算例 有限要素法による強度解析例を示す。導体、絶縁層、ステンレス鋼製リングサポートなど図示のようにモデル化し、それぞれ材料に対応した弾性率を使用して、計算精度を向上している。

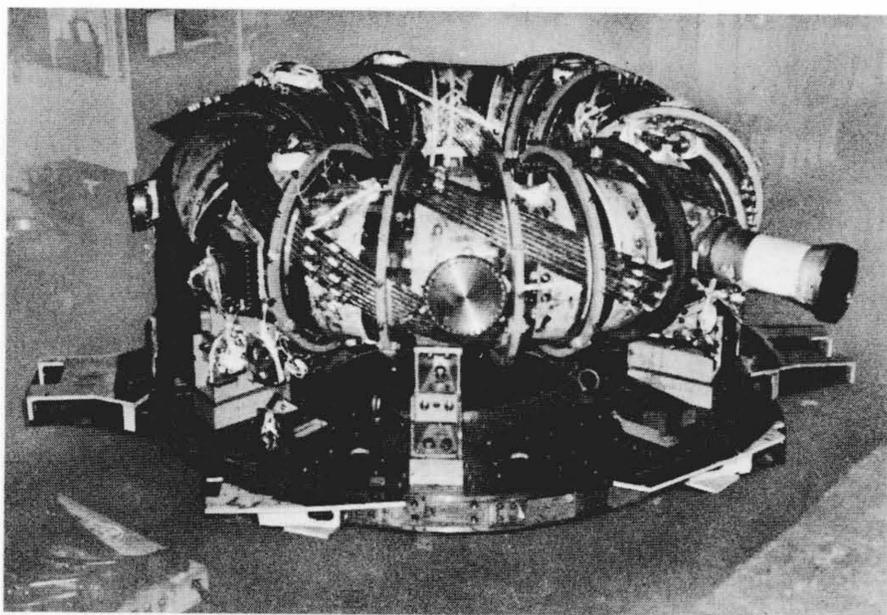


図7 ヘリカルコイル 卷棒に組み込んだヘリカルコイルを示す。

ーン回路を作らないよう2分割し、絶縁リングを介して結合している。また卷棒の外周には、ヘリカルコイルのガイド及び支持用として多数の部片に分割されたFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製ガイドを設けてボルトで固定し、その間にコイルが巻回されるヘリカル状溝を形成する。コイルは中空導体で、9ターンずつの4ブロックに分けて巻回され、各ターンは直列に接続されて励磁される。ヘリカルコイルには強大な自己電磁力とトロイダル磁場、垂直磁場などの外部磁場との相互作用による電磁力が作用する。このため、更にコイルの外周を抑える外周サポートを設けた。外周リングは2分割され、クランプにより結合している。

ヘリカルコイルはこのように複雑な形状、配置をしており、高度の製作技術が要求される。また、これらの電磁力やこれに基づく応力や変位の計算は簡単ではなく、従来その計算精度の向上、合理的な支持構造の設計製作などが困難とされ、大形でしかも強力なヘリカルコイルの技術的困難性が強調されていた。我々は電磁力や強度解析に計算機を十分に活用し、

これらの問題を解決した。図8~10にその計算例と一部実測データの比較を示す。これにより、ほぼ満足すべき結果が得られた。

導体で強度上最も難しい部分は、製作プロセス上どうしても必要となるトラス方向2分割部の接続構造である。我々は当初、この分割部を従来の例⁷⁾と同様のボルト締結構造としたが、建設中の初期試験の結果、この部分の弱点が明らかになったので銀ろう付方式に変更し、信頼性を大幅に向上させることができた。

6 ポロイダル磁場コイル

ポロイダル磁場コイルは、(1)プラズマ電流を発生維持するために0.57V·sの磁束を励起変化させる変流器一次巻線、(2)変流器鉄心を有効に利用するため、励磁パルスが終了し次のパルスが始動する前に、逆バイアスをかけて磁束レベルを負側に下げるバイアス巻線、(3)プラズマの上下方向位置を制御する水平磁場コイル、(4)水平方向の平衡を確保し位置制御を行なうための垂直磁場コイルなどにより構成される。

当初の実験では、直流垂直磁場コイルでプラズマ電流励起前に直流磁場を発生させておき、プラズマ電流立上げ時にはコンデンサ電源で励磁されるパルス垂直磁場コイルで、この一部分を打ち消してプラズマ電流に対応した合成垂直磁場を得た。また、プラズマ電流のフラットトップ部では、直流垂直磁場コイルと速応性サイリスタ電源により励磁されるフィードバックコイルにより平衡に必要な磁界を得るような方式で運転された。その後、パルス垂直磁場コイルと当初のフィードバックコイルを直列に接続し、容量を増やしたサイリスタ電源で励磁されるフィードバック制御系に組み込んだ。また当初の直流垂直磁場コイルの電源制御系を改造して、あらかじめ設定されたプログラムに従いプラズマ電流にほぼ比例して励磁されるようにした。フィードバックコイル電源は始めから投入され、プラズマ電流の立上げから停止まで、合成垂直磁場が最適値となるよう制御する方式とした。ただし、

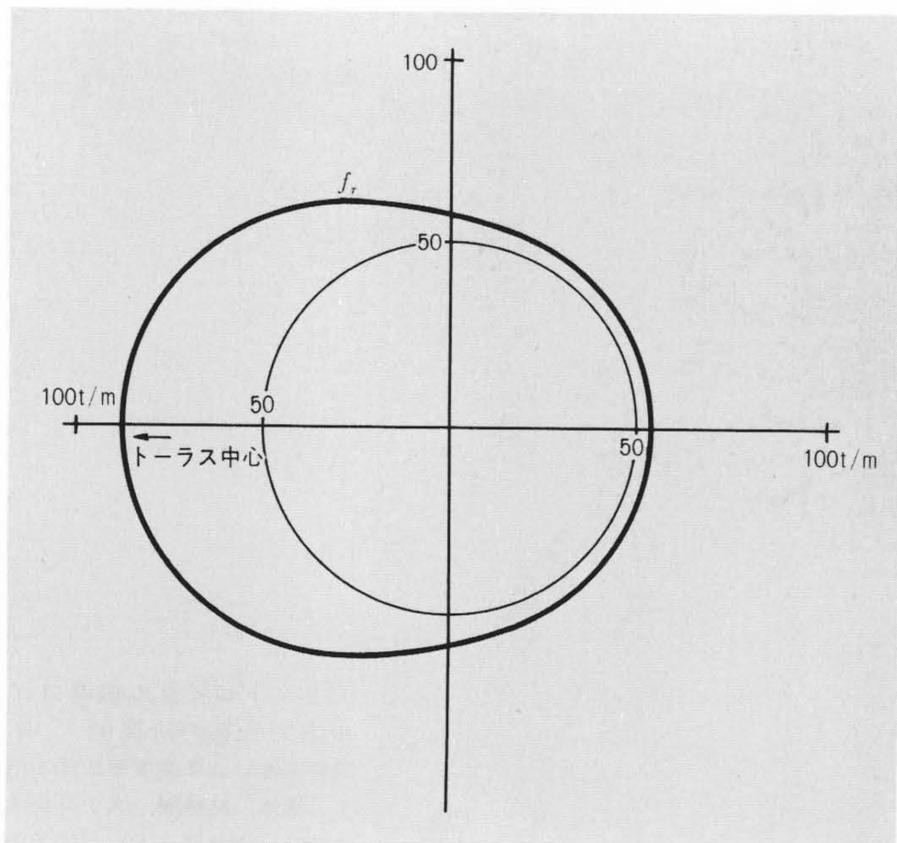


図8 ヘリカルコイルの小半径方向電磁力frの分布 ヘリカルコイルの小半径方向電磁力分布の計算例を示すもので、90t/mにも及ぶ強大な電磁力が作用する。

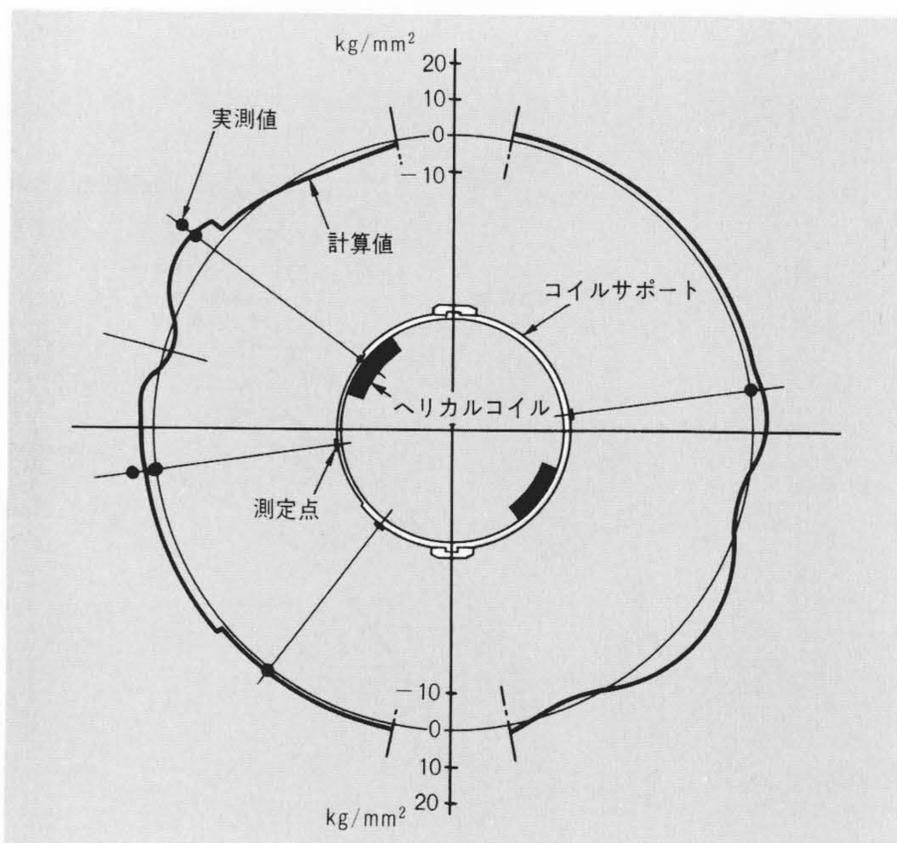


図9 サポートリングの応力分布 ヘリカルコイルを外周でサポートする、サポートリングの応力分布の計算値と実測値の比較を示す。

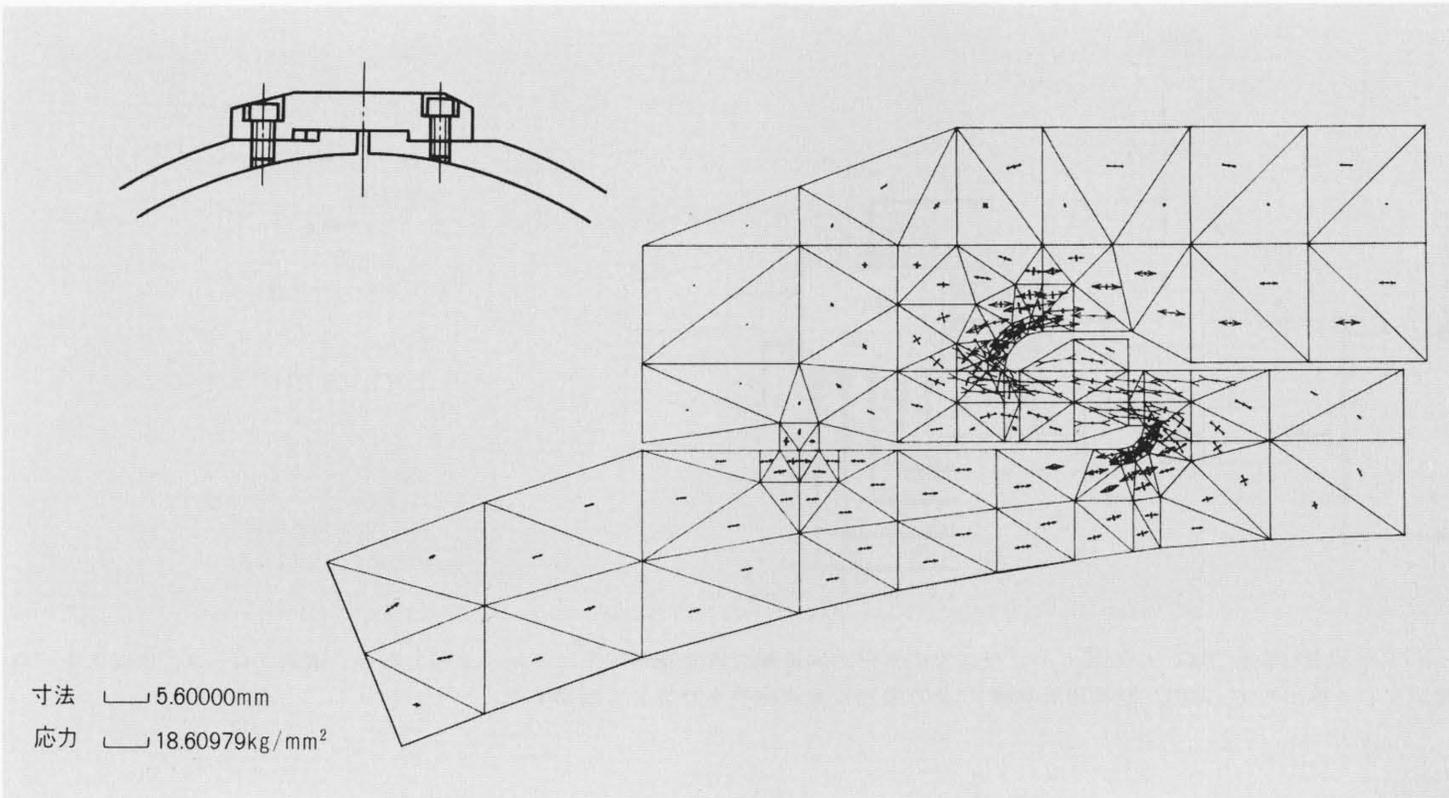


図10 サポートリングクランプ部の応力分布 ヘリカルコイル外周サポートリングのクランプ部の応力を、有限要素法で計算したものである。

トカマクとしては増強されたフィードバックコイル系だけで運転されている。

7 制御系とプラズマのフィードバック制御

実験装置“JIPPT-II”は、多くのコイルや電源、真空系などの補機から成り立っている。実験のときはすべての機器が正常であることを確認した後、各コイルを励磁する電源に対しタイミングよく作動信号を送るなど、プラント全系を円滑に制御する全体制御盤を設けた。

プラズマ位置の平衡は、垂直磁場と水平磁場の2系統のフィードバック制御により保持される。上下方向すなわち水平磁場による制御は、わずかな誤差磁場などの補正を行なうことにより達成されるので制御電力も小さくてよい。この水平磁場制御系は、名古屋大学プラズマ研究所の研究陣により設計され、まとめられた。ここでは、名古屋大学プラズマ研究所と日立製作所の協同検討に基づいて、日立製作所が製作した垂直磁場による水平方向位置のフィードバック制御系について述べる。

本装置の大きな特徴は、垂直磁場を作るコイルにフィードバック制御用コイルを設け、大電力サイリスタ電源により励磁し、計算機を含む系によってオンライン制御することによりプラズマの維持時間、閉じ込め時間を延長させることにある。この励磁電流によって作られる磁場の目標値 B_{vf} は、次の(1)~(4)式に示す差分方程式で、 $\Delta(t_{n+1}) = 0$ とおいたときの $B_{vf}(t_{n+1})$ の値となる。

$$\Delta(t_{n+1}) = K_1 \frac{U_1(t_{n+1})}{U_2(t_{n+1})} + K_2 + \frac{I_p(t_n)}{I_p(t_{n+1})} \left[\Delta(t_n) - K_1 \frac{U_1(t_n)}{U_2(t_n)} + K_2 \right] - K_3 \frac{t_{n+1} - t_n}{\tau_k} \cdot \frac{I_p(t_n)}{I_p(t_{n+1})} \left[\Delta(t_n) - \frac{U_1(t_n)}{U_2(t_n)} + \frac{K_4}{I_p(t_n)} \{ B_v(t_n) + B_{vf}(t_n) \} - K_5 \right] \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta(t_0) = \frac{U_1(t_0)}{U_2(t_0)} - C \dots \dots \dots (2)$$

$$U_1 = S_1 - S_2 \dots \dots \dots (3)$$

$$U_2 = S_1 + S_2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで $\Delta(t_{n+1})$: 時間 t_{n+1} におけるプラズマの基準位置からの変位

$K_1 \sim K_5, C$: プラズマの主、副半径などによって

決まる定数

I_p : プラズマ電流

B_v : 垂直磁場の強さ

B_{vf} : フィードバック磁場の強さ

U_1, U_2 : (3), (4)式により与えられるプラズマの位置に関する量

S_1, S_2 : 磁気プローブ1及び2からのプラズマの位置信号

今回は、この計算を日立制御用計算機HIDIC 350(加算時間 $1.8\mu s$)により行なうことにした。図11にフィードバック制御のブロック図を示す。

フィードバック制御の精度を上げるためには、サンプリング間隔は2ms以内が要求されることから、今回は電源に同期した720Hz(約1.4ms)のクロックをサンプリング周期とした。これにより、サイリスタ点弧までのむだ時間を短くすることができる。しかし、差分方程式の計算だけでも約1msの時間が必要となるため、電流制御のマイナーループを設けて、計算機からは磁束密度の目標値を与える方式とした。また、磁束密度は電流から変換した。

変流器コイルを励磁するコンデンサ電源に同期させることにより、プラズマ発生時点では垂直磁界の大きさを「零」にし、プラズマ電流に対応して増やすようにする。このとき、プラズマの位置や電流を検出して垂直磁場がプラズマ電流の立上げと維持に最適となるようにフィードバック制御する。これにより、プラズマ維持時間を200~500ms以上にすることが可能である。

図12に各コイルの電流波形の例を示す。

計算機の主な役割は差分方程式を解くことにあるが、そのために使用される時間はわずかなものである。そこで、制御中のデータを整理して、レコーダやタイプライタに打ち出すことにより結果の検討を行ないやすくしている。

更に、差分方程式の改善や実験の事前検討を行なうために、プラズマ位置やプラズマ電流をキーボードあるいは紙テープから入力して、フィードバック制御のシミュレーションが行なえる機能、あるいは測定値の校正などを行なう機能を付加して、計算機を有効に活用する工夫などを行なっているが、それらについては紙面の都合上詳細は割愛する。

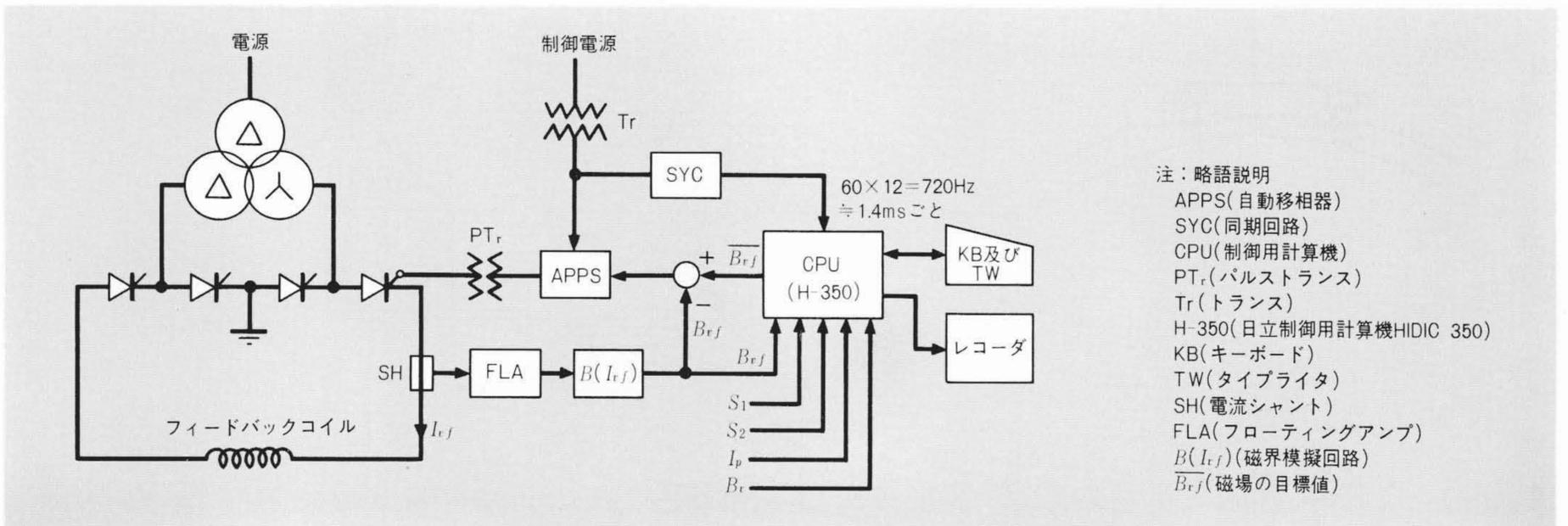


図11 プラズマ位置のフィードバック制御系ブロック図 プラズマの水平方向位置の負帰還制御系のブロック図である。磁気プローブ、ロゴスキークoilなどによりプラズマの位置、電流などを検出して、CPU(制御用計算機)により妥当な垂直磁界を計算して制御する。

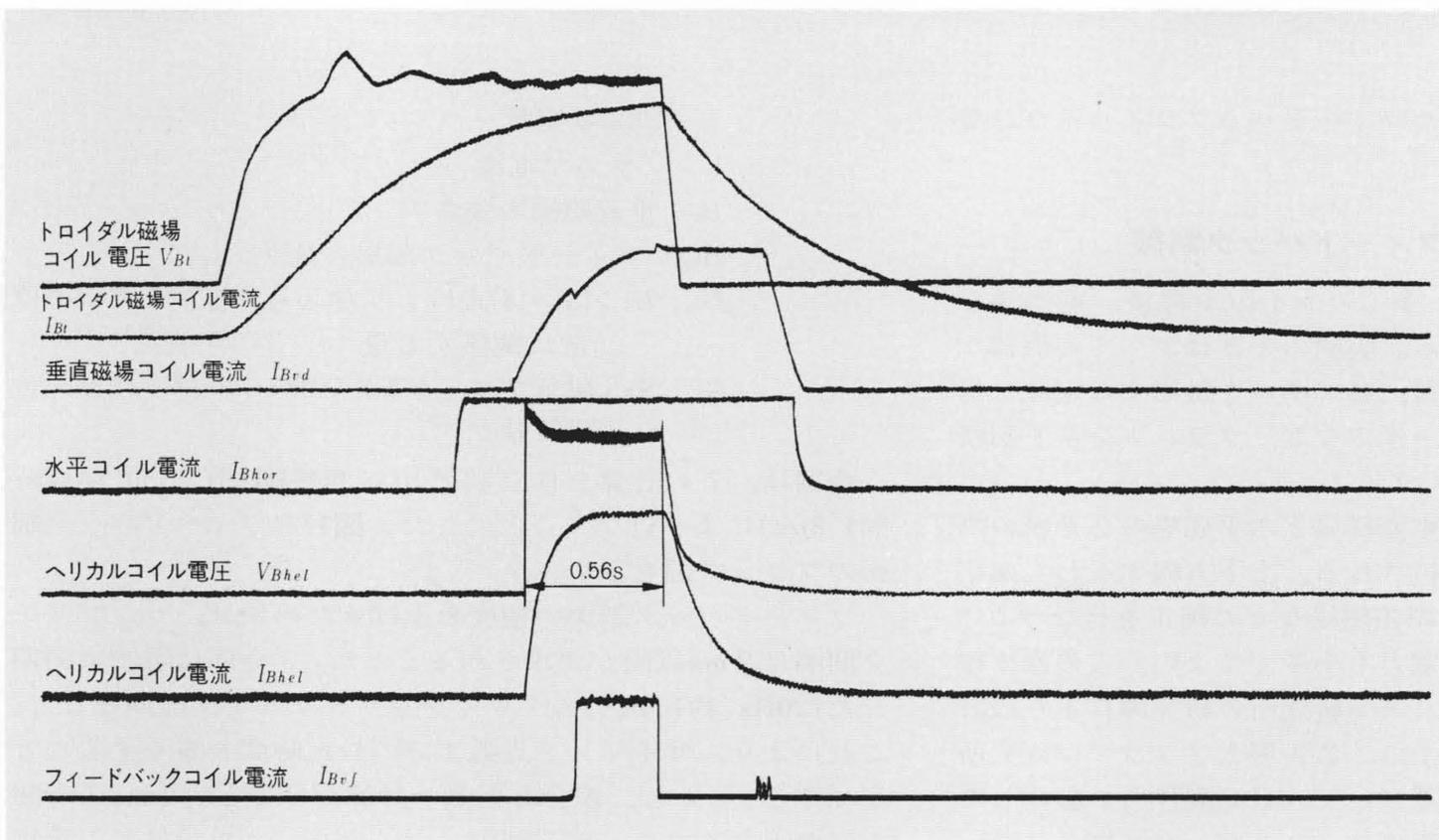


図12 各コイルの電流波形の例 調整試験中の典型的な各コイルの励磁電流波形を示す。

8 結 言

実験装置“JIPPT-II”は、昭和51年予定どおり建設を完了しその後順調に稼動しており、既に第一段階のトカマク運転で、名古屋大学プラズマ研究所を中心とする研究陣により多くの輝かしい成果が得られている^{1)~4)}。ヘリカルコイルを使用するステラレータ運転による研究は着手して間もないが、既に注目すべき成果が得られている。

これらのデータが今後続々と発表され、核融合研究進歩の重要な原動力として、ますますその存在意義を高めてゆくと期待される。

他方、設計、製作の過程で幾多の困難に遭遇したが、一つ一つこれらを解決し、その過程で獲得してきた多くの技術は既に一部は京都大学の「ヘリオトロンE」や原子力研究所の“JT-60”などの設計、製作に適用し活用されている。この貴重な経験を、名古屋大学プラズマ研究所第3次計画など、今後建設される同種装置にも生かしてゆきたいと願っている。

終わりに、本装置の設計、製作に当たり貴重な御助言と御指導をいただいた名古屋大学プラズマ研究所所長・高山理学

博士、同所教授・松浦工学博士、同所教授・宮本理学博士及び同所助教授・棚橋工学博士、ほか関係各位に対し厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) FUJITA, J. et al. : 6th IAEA Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (1976), Nucl. Fusion, Suppl. 1977, Vol. II, p. 95
- 2) FUJITA, J. et al. : 7th IAEA Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (1978), IAEA-CN-37/N-2
- 3) K. Toi et al. : Nucl. Fusion 19, 1643 (1979)
- 4) 名大プラズマ研専門委：第3次計画作業報告，核融合研究，42/別冊その5（昭53-9）
- 5) 例えば、水野：プラズマ研究所における核融合研究の現状，原子力学会誌，21，825~832（昭54-11）
- 6) 加沢，外：“JIPPT-II”トロイダルコイルの強度解析，核融合連合講演会予稿集，142（昭53-2）
- 7) 井村，外：ステラレータ型核融合実験装置 JIPPT-1，日立評論，56，965~970（昭49-10）