

# ステラレータ形核融合実験装置“JIPP-T-1”

## “JIPP-T-1” Stellarator for Nuclear Fusion Research

Recently Hitachi has completed with success a stellarator type experimental nuclear fusion apparatus, “JIPP-T-1,” for Institute of Plasma Physics, Nagoya University.

Its helical windings were designed and made in the  $l=3$  type in the first stage, and later remodeled into the  $l=2+3$  type.

One of the features of this stellarator worthy of note is the unusually high degree of measurement accuracy of its components and whole assembly.

This article introduces the outline of the stellarator and its technical problems.

井村泰也\* *Yasuya Imura*

斎藤龍生\* *Ryusei Saitō*

加沢義彰\* *Yoshiaki Kazawa*

### 1 緒 言

最近、核融合プラズマ閉じ込めの研究が急速に進展しているが、特にトカマク形、ステラレータ形などの低ベータ トーラス装置による成果が著しい。現在トカマク形が最もローソンの臨界条件に近く、最初の臨界炉として期待されている。我々も日本原子力研究所の“JFT-2”<sup>(1)</sup>などの実験装置製作を通じてこの開発研究の一翼を担ってきたが、本質的にパルス炉となる可能性の大きいトカマク形に対し、将来、定常炉となり得るポテンシャルを有するステラレータ形やヘリオトロン形も長期的観点からはその研究開発は極めて重要である<sup>(2)</sup>。本稿では日立製作所が名古屋大学プラズマ研究所（以下、プラズマ研究所と略す）から受注して建設した我が国初のステラレータ形核融合実験装置JIPP-T-1の技術面について述べる。本装置は第1ステップで $l=3$ 形のステラレータとして建設され、貴重な実験的成果を得た<sup>(3)</sup>後、第2ステップでヘリカルコイルと放電管を新しく製作して $l=2+3$ 形のステラレータに改造して現在実験的研究に使用されている。ステラレータはアメリカ、プリンストン大学で早くから開発研究が行なわれ、特にその「モデルC形」は規模も大きく成果が期待されていたが、予期されていたほどの性能は得られず、プラズマの振舞いの基本的理解や閉じ込め理論と実験の発展に大きな役割を果たしてその使命を終えている。閉じ込め時間などが予想を下回ったのは回転変換やシャー（「シャー」とは、隣り合う磁力線間の「ずれ」で、これが大きいことが望ましい。）などが十分でなく、また完全な円形トーラスではなくレーストラック状であり、対称性が悪かったことのほか、磁界分布精度も余り良くなかったことなどが主要な原因ではないかと推定されている。これを裏付けるようにその後イギリス、西ドイツ、ソ連などで建設された真円状ステラレータでは小形ではあるが最近非常に良いプラズマ閉じ込め性能が相次いで確認されている。

一般にプラズマの閉じ込めには極めて高精度の磁界分布が要求されるが、特にステラレータは磁界のわずかな乱れがプラズマの安定性に大きな影響を与えられている。我々は各種の先行試作とプラズマ研究所の指導及び協力により高

度の技術を要する複雑なコイルや放電管の製作にいどみ、従来の電気技術の常識を打破する高精度でしかも信頼性の高い装置を建設することができた。以下、その概要について述べる。

### 2 装置の概要

“JIPP-T-1”本体部の外観は図1に、その構成は図2に示すとおりである。中央部にプラズマを閉じ込める円環状の放電管を有し、その外周にヘリカル磁界を発生するヘリカルコイルが巻かれている。ヘリカルコイルは最初に製作した $l=3$

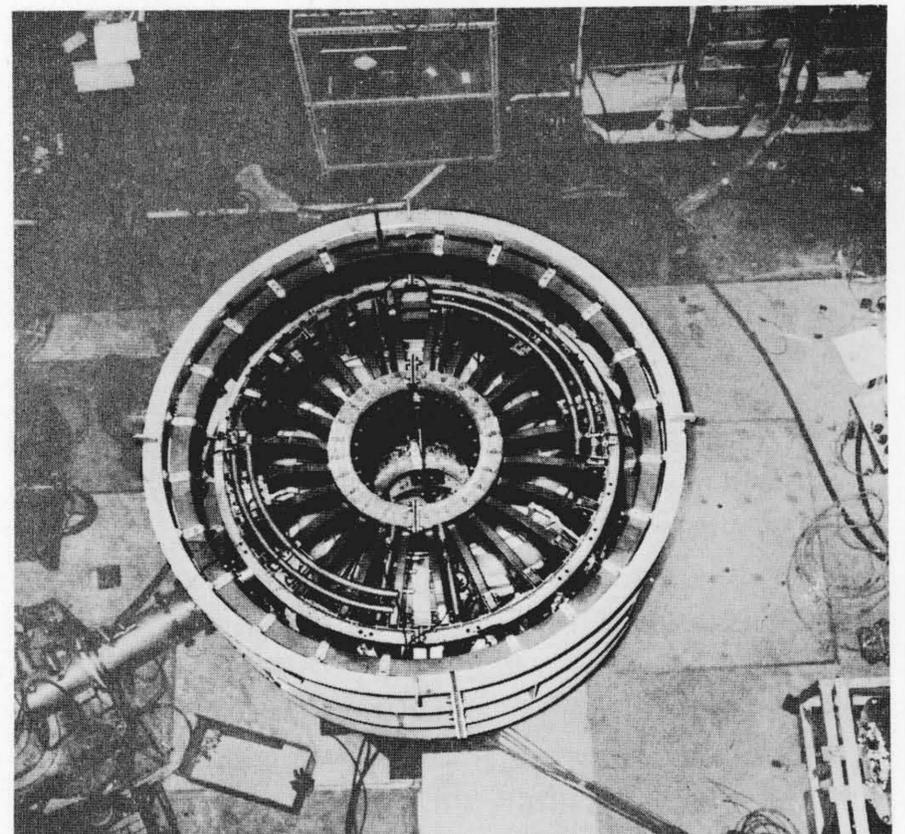


図1 ステラレータ装置の外観 上方より見た装置の外観で、環状らせん状に巻線されたヘリカルコイルを有する点が、他のトーラス形核融合装置にない特徴である。

Fig. 1 View of JIPP-T-1 Stellarator

\* 日立製作所日立工場

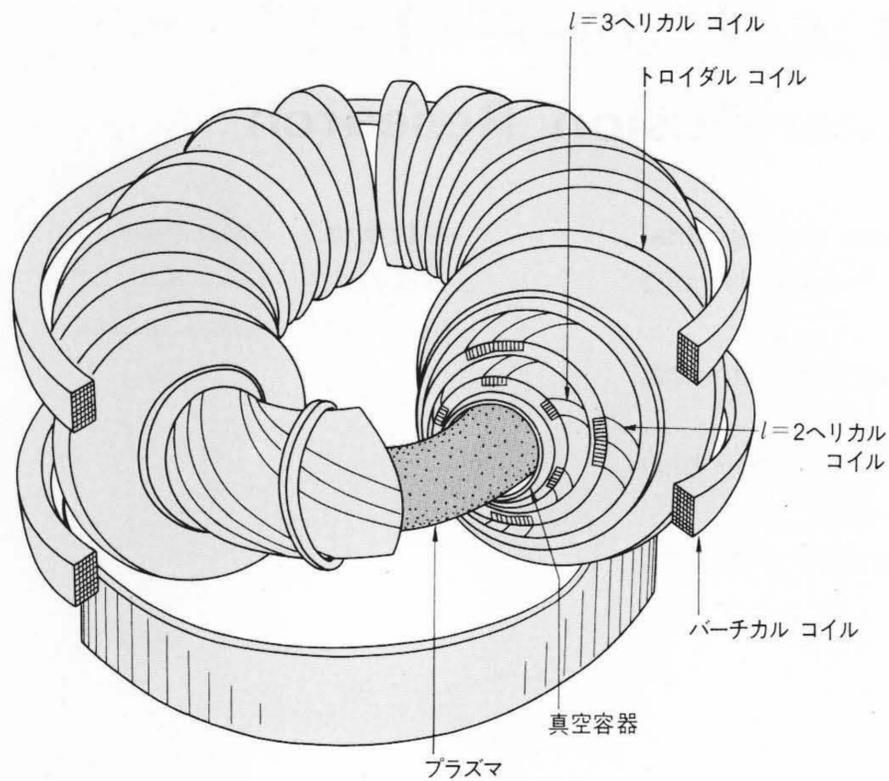


図2 ステラレータ装置の構成 装置の真空容器及びヘリカル コイル、トロイダル コイル、バーチカル コイルなどの構成について図示したものである。

Fig. 2 Component of Stellarator

形では放電管の外周に直接一層で巻かれたが  $l=2+3$  形では二重巻わくに2層に巻かれている。このヘリカル コイルの外側に24個に分割されたトロイダル コイルがトーラス全周に等間隔に配置されている。またこの上下には、垂直磁界を生成する円形リング状のバーチカル コイルが配置されている。これら三つのコイルにより回転変換とシャーのあるプラズマ閉じ込め磁界が形成される。

放電管及びコイル類の主な仕様は表1に示すとおりである。

本装置の主な技術的特徴は、次に述べるとおりである。

- (1) コイルの寸法及び組立精度を厳しく押えている。特に複雑な形状を有するヘリカル コイルの精度は巻わくや巻線ガイドに最新の技術を駆使して可能な限界を更新している。
- (2) 給電線や接続線には可及的に同軸構造を採用するとともに、同軸化の不可能な部分は近接した往復導線とするなどの配慮により、不整磁界（磁界の乱れ）を極限にまで小さくしている。
- (3) ヘリカル コイルは機械加工されたガラス繊維強化プラスチック（FRP）またはFRP製巻わくの溝中に巻回して精度を保持するとともに、対地絶縁の強化を図り強大な電磁力に耐え得る構造としている。
- (4) 狭いスペースに大起磁力のコイルを配置するためコイル及び接続線はすべて中空導体による直接水冷方式とし、特にヘリカル コイルのトーラス方向2分割部の構造には冷却のほか、接続部の信頼性向上、不整磁場の抑制などを考慮した特別なくふうが施されている。
- (5) 放電管にはSUS-316を使用するとともに、その溶接棒、耐真空溶接開先部などにも特別な考慮を払い、透磁率を極めて低い値に抑え磁界の乱れをなくしている。

### 3 放電管

放電管はプラズマの閉じ込めの空間を形成する円環状の金属製真空容器であり、トロイダル コイルと鎖交して設置される。金属製放電管は、プラズマの形成時電氣的な境界条件を

表1 JIPPステラレータの主仕様 放電管及びコイル群の仕様を示すもので、 $l=3$ 形、 $l=2+3$ 形の仕様を併記してある。

Table 1 Principal Specification of JIPP-T-1 Stellarator

区分	項目	数 値	
		$l=3$	$l=2+3$
放電管	トーラス径	1,000mmφ	1,000mmφ
	管内径	168mmφ	140mmφ
	透磁率	1.1以下	1.1以下
	トーラス2分割の耐電圧	AC 500V	AC 800V
ヘリカル コイル $l=3$	起磁力	$1.35 \times 10^5$ AT	$0.83 \times 10^5$ AT
	デューティ	3秒通電, 週期63秒	2秒通電, 週期62秒
	トーラス半径	500mm R	500mm R
	小径平均半径	106mm R	91mm R
	巻線精度	0.5mm以下	0.5mm以下
ヘリカル コイル $l=2$	起磁力	—	$1.2 \times 10^5$ AT
	デューティ	—	2秒通電, 週期62秒
	トーラス半径	—	500mm R
	小径平均半径	—	124mm R
	巻線精度	—	1mm以下
トロイダル コイル	起磁力	$1.01 \times 10^6$ AT	
	デューティ	5秒通電, 週期65秒	
	内径	340mmφ	
	分割ブロック数	24	
バーチカル コイル	起磁力	$4 \times 10^4$ AT	
	デューティ	連続	
	内径	1,726mmφ	
	分割ブロック数	2	

与えること及びステラレータにおいてはヘリカル コイル巻線の基準となるため、高精度の寸法的対称性と、材質的な均一性（非磁性）とが要求される。

金属製放電管の材料としては、普通オーステナイト系ステンレス鋼が用いられるが、塑性加工、溶接作業において磁氣的に安定な材料を厳選採用し、溶接棒の材質にも特別な注意を払っている。塑性加工は寸法精度を確保するためにトーラスを水平面に2分割し、各をプレス加工で成形し（特許公報昭48-14998）内部表面処理を行なった後、不活性ふんい気中で溶接及び焼鈍を行なっている。溶接ビード量は極力少なくし、且つ管厚の溶接部における違いは図3に示すように同系材質のワイヤを埋める（特許出願中）など、変形防止と、磁氣的均一性を保つため細心の注意を払っている。

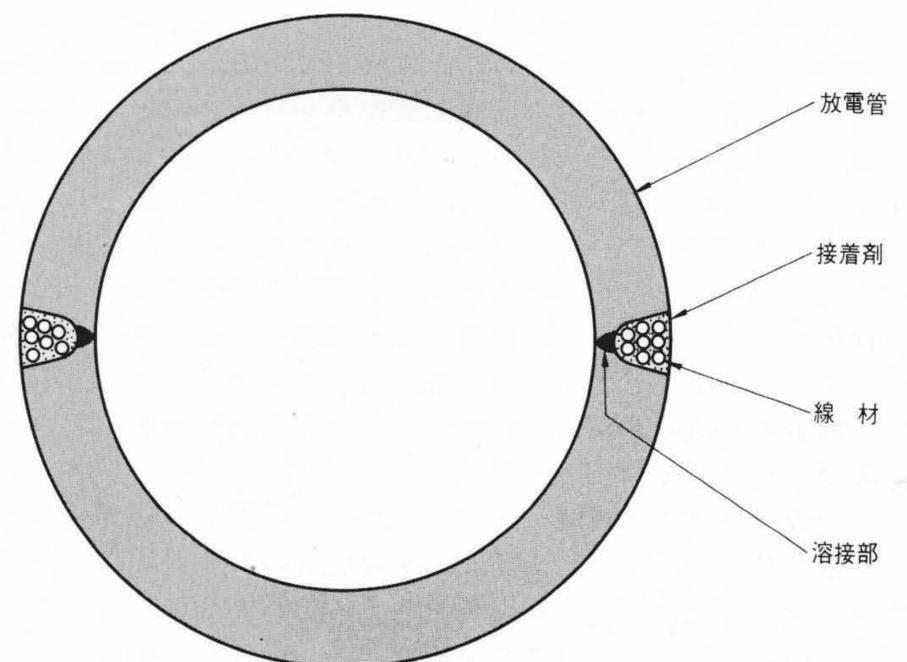


図3 放電管の断面図 放電管は、二つ割半円状のものが溶接により結合されている。

Fig. 3 Cross Section of Vacuum Vessel

放電管はこの後、大円の直径に沿って2分され、切断部端面真空シール部加工、ヘリカルコイルの基準となる放電管外周の加工を行なっている。なお  $l = 3$  方式の装置ではヘリカルコイルと放電管を絶縁する目的で金属放電管外周に絶縁層を形成し(特許公報昭48-8558)、この外周を特殊治具により高精度に加工している。

放電管の2分割部にはセラミックリングによる絶縁を行ない、ジュール加熱時などの際に生ずる放電管によるワンターンショートを防止した構造としている。また数十個所に及ぶ観測用ポートが設けられており、各真空シールを介し外方に延長できる構造になっている。

**4 ヘリカルコイル**

**(1)  $l = 3$  形**

高精度、対称磁界の形成において、物理計算から要求される理想的な磁界分布とコイル配置の実現を妨げるものは、コイルの給電部を主体とする端末部の影響である。従って、理想磁界の実現にはこの端末の数を極力少なくするとともに、これらに対称的に配置したり、あるいは打消し電流路を設けるなどすることが必要である。

本装置では  $l = 3$  ヘリカルコイルの軌跡を表わす式として次の(1)式を採用している。

$$\varphi = \frac{1}{3}\theta + \frac{2\pi}{6}(N-1) + \theta_1 \quad (N=1, 2, \dots, 6)$$

(rad) .....(1)

- ここに、 $\varphi$  : 管断面回転角 (rad)
- $\theta$  : トーラス回転角 (rad)
- $\theta_1$  : トーラス回転初期角 (rad)
- $N$  : コイル数

図4は、この(1)式で巻線したコイルの外観を示すものである。

この方式の特徴は一般の  $\varphi = 3\theta$  方式が巻線が大円を1回回ると同時に始発点にもどってくるため、始発点を避けるために巻線を変位させねばならぬのに対し、大円を3回回って初めて始発点にもどってくるという点である。従って、始発点と終点との一致する数は  $\frac{1}{3}$  に減ずるため、この部分に同軸形の口出しを設けることが可能となり巻線中の変位を皆無にできる(特許公報昭48-15840)。

本装置ではヘリカルコイルはすべて中空導体を用いた直接水冷方式を採用した。これにより大電流、高電流密度及び高繰返し通電が可能となっている。

同軸口出し部の構造は図5に示すとおりである。この部分についても直接水冷構造は内部導体、外部導体ともに保持されている。また同軸部は対称配置とし、この部分へのフィー

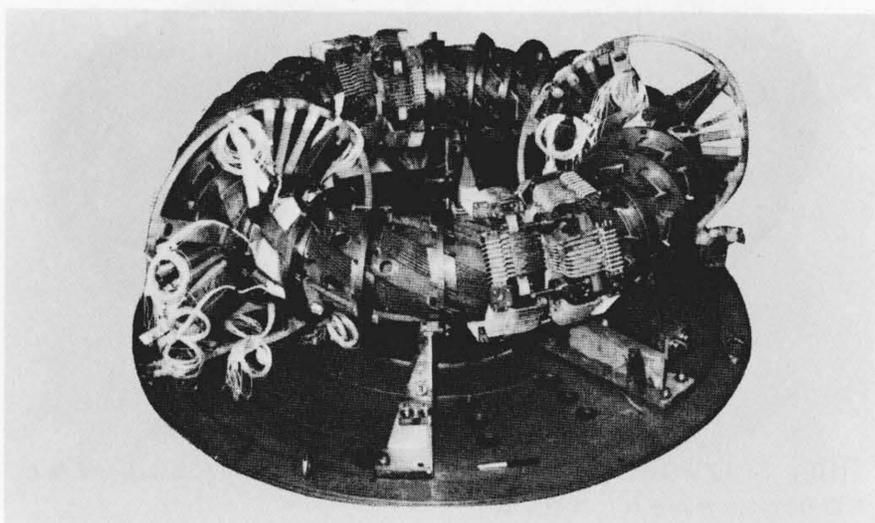


図4  $l = 3$  形ヘリカルコイル 外周表面を、絶縁された放電管にヘリカルコイルが巻回されている。

Fig. 4 Outside View of  $l = 3$  Type Helical Coil

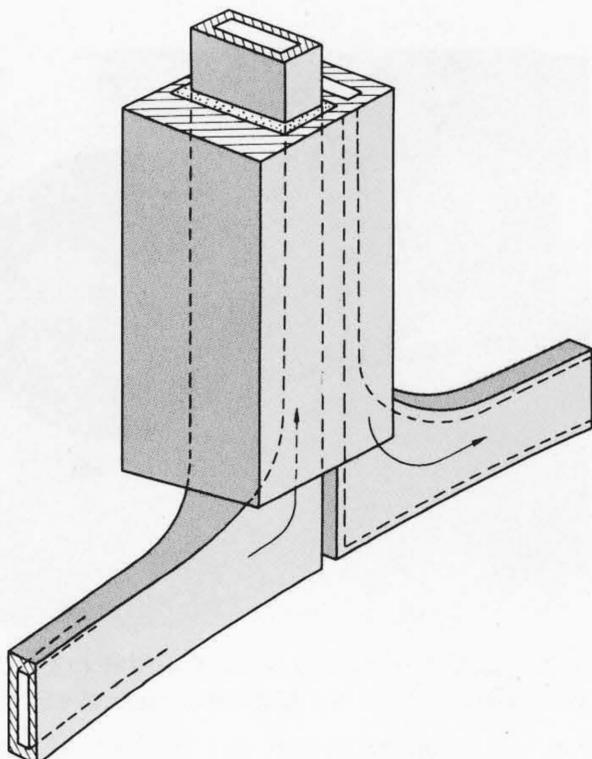


図5 ヘリカルコイルの給電部 コイル導体を角形、中空とし、同軸構造としてある。

Fig. 5 Coaxial Feeder of Helical Coil

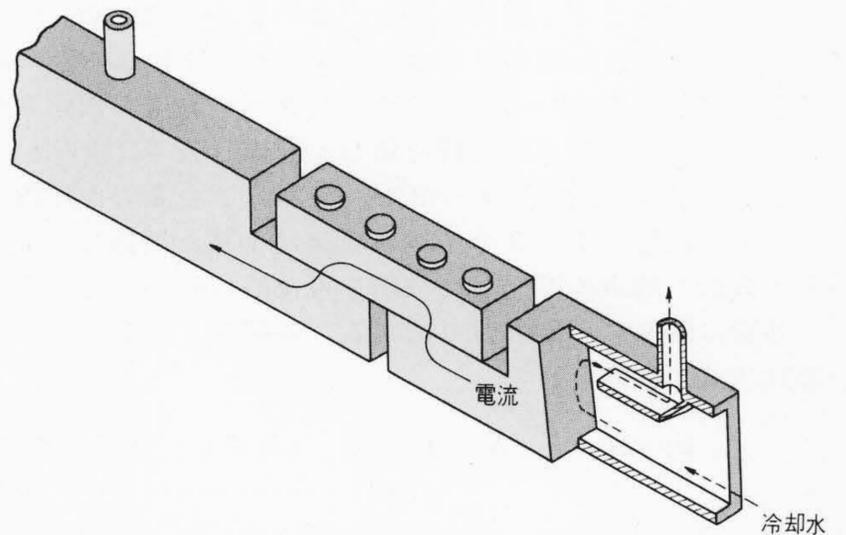


図6 ヘリカルコイルの接続部 トーラス方向2分割接続部導体1本を取り出したもので、水冷を十分に行ない小径ねじでも大電流に耐え得る構造にしてある。

Fig. 6 Connector of Helical Coil

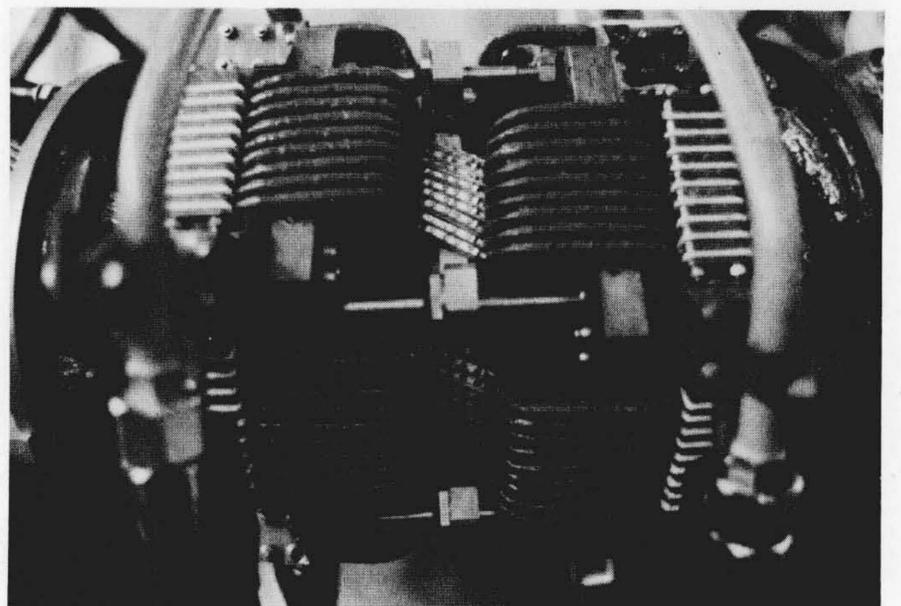


図7  $l = 3$  形ヘリカルコイルの接続部 コイル接続部を主体に冷却水及び放電管の分割部外観を示す。

Fig. 7 Outside View of Connectors of  $l = 3$  Helical Coil

ダも中心から離れた位置で平行2線方式とし、放電管中心部での磁界の乱れを極力少なくする配慮がなされている。ヘリカルコイルにおけるいま一つの技術的ポイントは、放電管分割部のコイル接続である。本装置においては、この部分でも理想的な巻線の軌跡を乱すことなく、コンタクトピースによる接続が可能な構造となっている。

図6～7は、接続部の構造を示すものである。この部分は隣接する中空導体水冷却からの間接冷却となっているが、規定通電パルス10回ではほぼ定常の温度上昇に達し、短時間の休止で基底温度まで冷却が可能である。ヘリカルコイルは流路単位にサーミスタ温度計素子を埋入してあり、電源とインターロックが施されている。ヘリカルコイルの巻線に際しては巻線の基準となる型を数値制御工作機で加工し、巻線専用トラス上にこれを正確に配置して巻線を行なった後、放電管上にこれを移し、精密けがきに合わせて固定する方法を採用し、精度±0.5mm以内のヘリカルコイルを実現することに成功した。

図8は、ヘリカルコイルの巻線状況を示すものである。

(2)  $l=2+3$ 形

ステラレータは極数  $l$  によって異なったプラズマ閉じ込め性能を示す。すなわち、 $l=2$ 形は軸近傍では回転変換は大きいがシャワーが小さく、 $l=3$ 形はシャワーは大きいが中心に近づくほど回転変換角が小さいという傾向がある。従って、この二つを組み合わせた  $l=2+3$ 形は良好なプラズマ閉じ込め性能を示すことが期待される。このような観点から、プラズマ研究所から前述の  $l=3$ 形ステラレータによる実験が一段落した後、 $l=2+3$ 形ステラレータへの改造を依頼され、ヘリカルコイル及び放電管を新しく製作し装置に組み込んだ。

このコイルは内層に  $l=3$ 形、外層に  $l=2$ 形が配置されている。内層の  $l=3$ コイルの軌跡は(1)式と同様で、前述の  $l=3$ 形の利点や開発した技術を可及的に採用している。その外観は図9に示すとおりである。外層の  $l=2$ コイルの軌跡は次式で表わされる。

$$\varphi = 2\theta + \frac{2\pi}{4}(N-1) + \theta_1 \quad (N=1, 2, \dots, 4)$$

(rad) .....(2)

ここで、記号は  $l=3$ コイルと同じである。

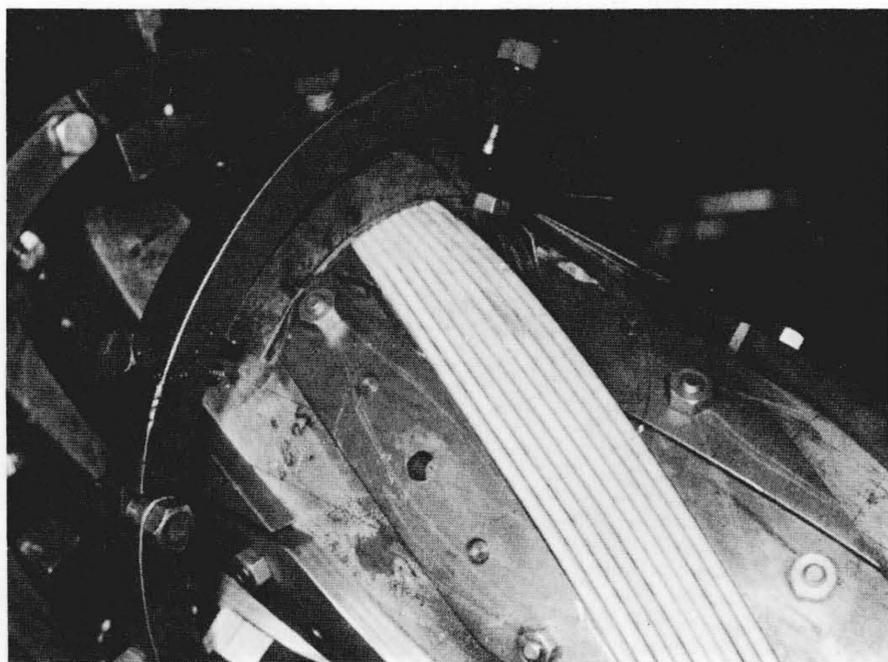


図8  $l=3$ 形ヘリカルコイル  $l=3$ 形ヘリカルコイルを巻わくに巻回した一部分を示す。

Fig. 8  $l=3$  Type Helical Coil

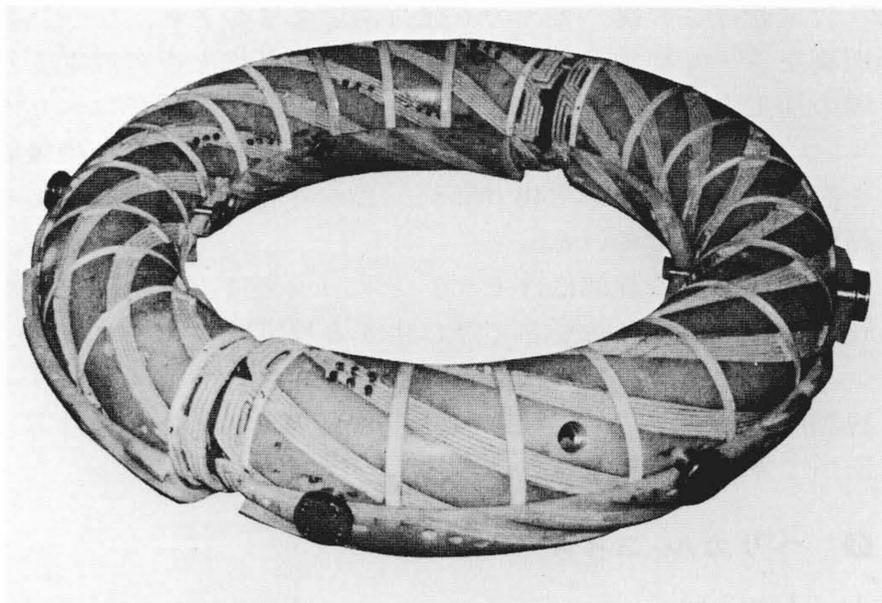


図9  $l=2+3$ 形ステラレータの内層コイル 内層  $l=3$ ヘリカルコイルを巻わくに巻回された外観を示す。

Fig. 9 Inner Helical Coil of  $l=2+3$  Type Stellarator

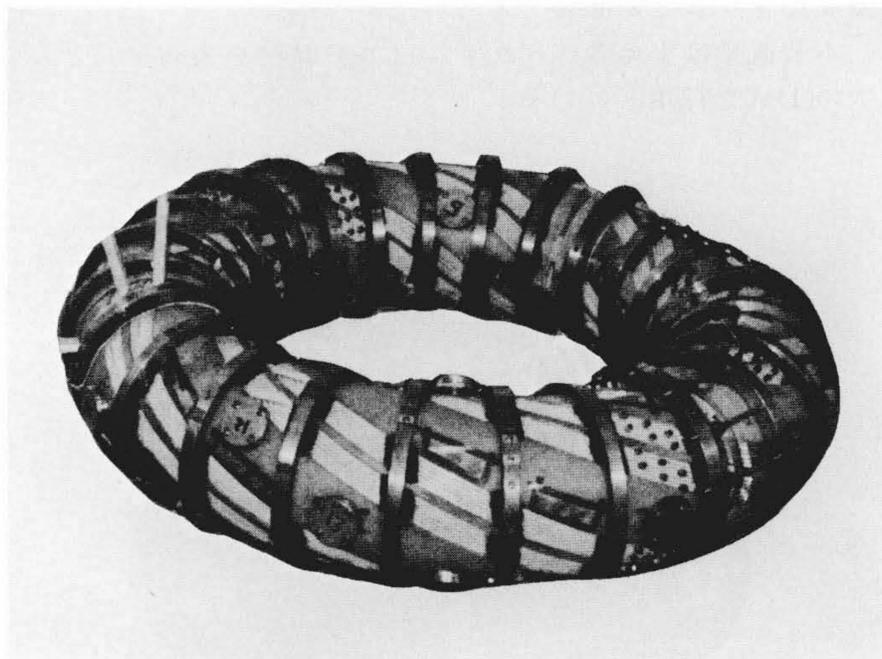


図10  $l=2+3$ 形ヘリカルコイル  $l=3$ 巻わく上に  $l=2$ 巻わくを取り付け、巻回された外観を示す。

Fig. 10 Outside View of  $l=2+3$  Type Helical Coil

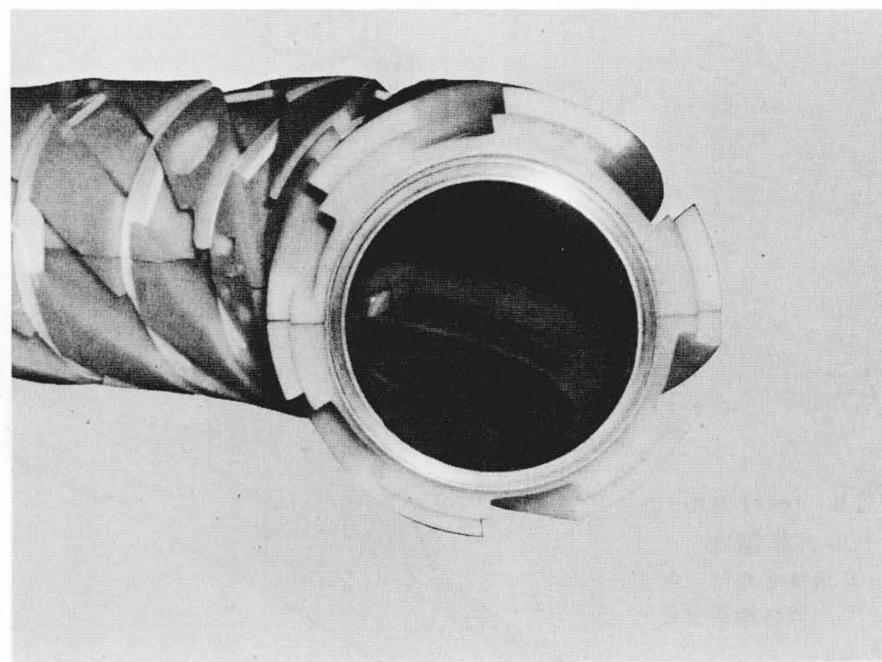


図11 放電管とヘリカルコイル用巻わく トーラス状放電管とヘリカルコイル用巻わくを2層積み重ねた断面部を示す。

Fig. 11 Vacuum Vessel and Bobbins of Helical Coil

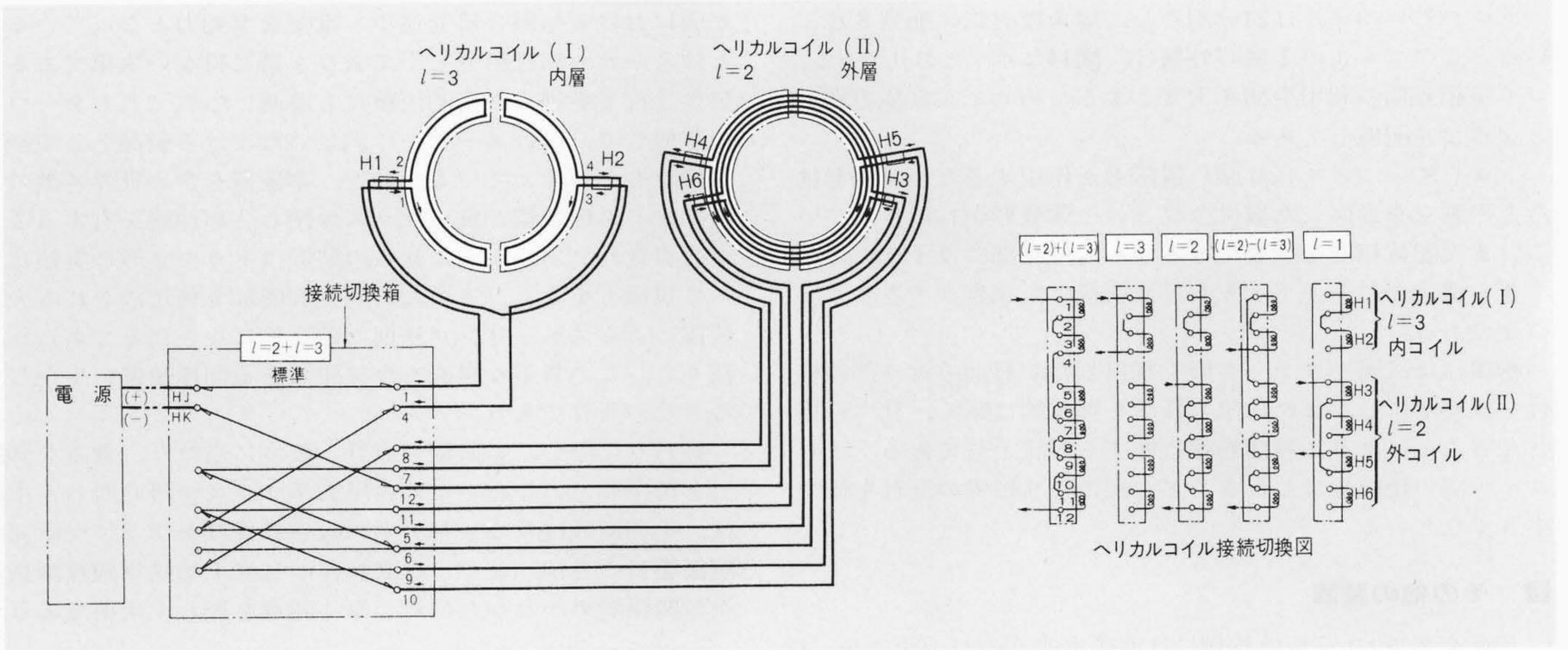
このコイルの外観は、**図10**に示すとおりである。  
 これらのコイルは溝を有する絶縁体の巻わくに収められている。  
 この巻わくはプラズマ研究所が取りまとめて加工した後、日立製作所に支給された<sup>(7)</sup>。

**図11**は、内層  $l=3$  コイル用巻わくと外層  $l=2$  コイル用巻わくとを組み合わせた状態を示すものである。

$l=2+3$ 形ヘリカル コイルもトロイダル コイルを組み込む必要上、トーラス円周方向に2分割した構造となっている。

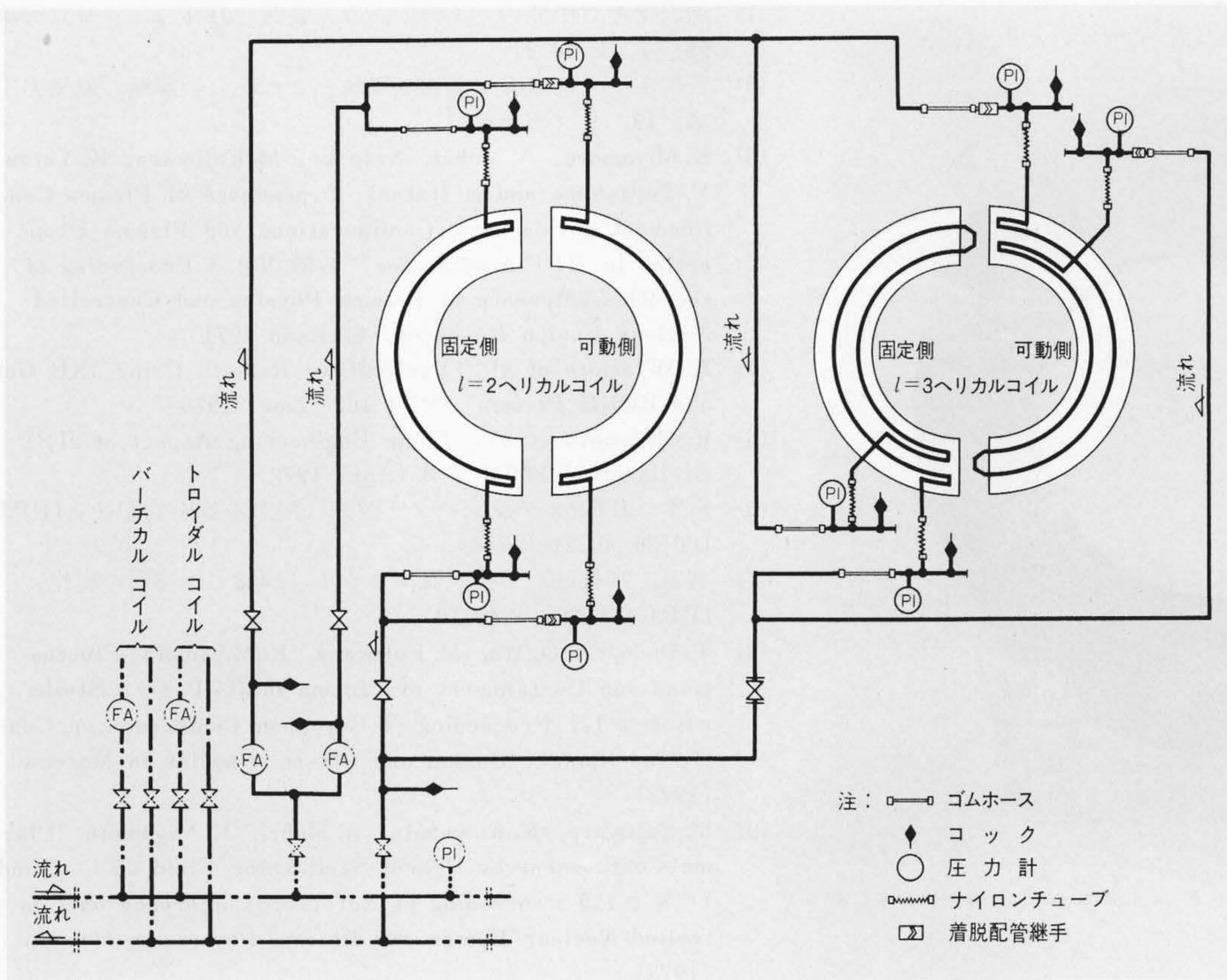
内層コイルの分割部接続は、外層コイルが外周に配置されるため、ねじ止めなどの機械的接続が困難なので**図9**に示すように、機械的にははめ合うのみで、電気的にはあたかも接続したような構造となり不整磁場も小さくなっている。

この構造の特長は機械的に接続されていないため、接触抵抗が問題となる接続部がなく、また組立が簡単で保守上便利なことである。外層  $l=2$  コイルの分割部接続は前述の  $l=3$  形と同様の構造としている。給電部、接続線などは  $l=3$  形と同様の水冷同軸構造としている。



**図12**  $l=2+3$ 形ヘリカル コイル接続図 この接続図から分かるように、各種の切換えができるように配慮してある。

Fig. 12 Connection Diagram of  $l=2+3$  Type Helical Coil



**図13**  $l=2+3$ 形ヘリカル コイルの冷却水系統図 ヘリカル コイルの各導体に冷却水を通してあり、図中では導体1本のみを示してある。

Fig. 13 Flow Sheet of Cooling Water for  $l=2+3$  Type Helical Coil

コイルやリード線は図12, 13に示すように複雑に接続され、通水される。これを製作するためには数百個所に及ぶ中空導体部片間のろう付作業が必要で、しかもこのろう付個所は通電に必要な十分な断面積の確保と冷却水の完全なシール性能を要求される。我々は技術的に問題となる部分については先行試作を行なうとともにこれらのほとんどすべてについて非破壊検査を行ない、製作の1ステップごとに耐圧試験、通水試験を繰り返して異常の早期発見に努め、トラブルの未然防止に万全を期している。

## 5 トロイダル コイル

トロイダル コイルは24分割とし、等角放射状に配列されている。このコイルの1個の外観は、図14に示すとおりである。コイル相互間の利用空間を大きくするためコイルは極力薄形となるよう配慮してある。

トロイダル コイルには強い電磁力が作用するため、薄形構造との両立を意図した取付金具との一体成形が採用されている。また配置精度を調整できるように取付足部にライナを挿入できる構造とし、上下、左右及び前後に微調整ができるようにしてある。

巻線には二層パンケーキ形を採用したが層間の渡り部の移行を緩やかにし、また口出し長さを可及的に短く、且つ近接させることにより、理想巻線に準ずる形状としてある。またコイル間の接続線は並行巻もどし線により磁界の乱れを極力小さくしている。

## 6 その他の装置

トロイダル コイルの外側には直接水冷式のバーチカル コイルを設けてあり垂直方向の磁界を発生する。

装置全体は共通架台にマウントされている。架台は放電管

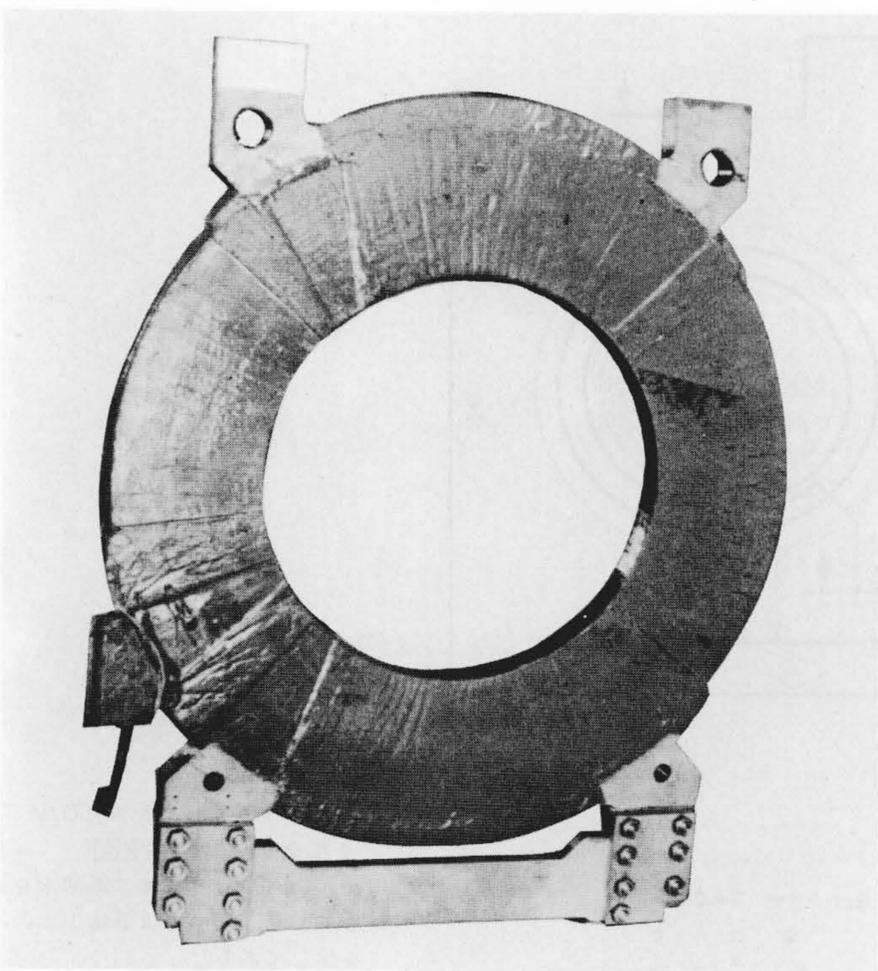


図14 トロイダル コイル ユニット このコイルは、分割数を多くするため、薄形となっている。

Fig. 14 Toroidal Coil Unit

の分割位置に合わせて2分されており相互に絶縁するとともに、一方は手動で移動可能とし装置の操作を容易にしている。

## 7 結 言

本装置は製作完了後、寸法精度の測定、通電による温度上昇試験、耐電磁力試験、耐電圧試験などを行ない厳しい仕様を十分に満足していることを確認した。これらの主なものはプラズマ研究所によっても再チェックされ、また他の方法でも所定の精度と性能が確認されている<sup>(4)-(7)</sup>。既にこの装置による数多くの優れた実験的研究が、プラズマ研究所及びこれに関与する全国の研究者により実施され<sup>(3)(8)(9)</sup>、現在も我が国における核融合研究進歩の重要な原動力となっていることはメーカー側技術者として喜びを禁じ得ない次第である。製作過程で各種の技術的困難にも遭遇したが、これらを一つ一つ克服して、ほぼユーザーに満足いただける製品として納入し得たものと考えている。最近、本装置を含め世界各地のステラレータ形装置が良いプラズマ閉じ込め性能を有することが報告されているが、これらの装置はトカマク形の実績に比べて規模も小さく、その最終的な評価は今後建設される大形装置によるスケーリング法則の確立後になされるであろう。我々も、この貴重な経験を今後建設する同種装置に生かしてゆきたい所存である。

終わりに際し、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の宮本教授、毛利助教授及び京都大学の板谷教授ほかプラズマ研究所関係委員の各位、並びに日立製作所日立工場笠原副技師長ほかの関係者のかたがたに対し厚く謝意を表わす次第である。

## 参考文献

- (1) 加沢ほか「中間ベータ値トラス装置“JFT-2”」日立評論 55, 7 (昭48-2)
- (2) 吉川庄一「核融合炉開発の現状とこれからの課題」原子力工業 19, 9 (昭48-11)
- (3) K. Miyamoto, A. Mohri, N. Inoue, M. Fujiwara, K. Yatsu Y. Terashima and R. Itatani "Dependence of Plasma Confinement on Magnetic Configurations and Plasma Properties in JIPP Stellarator" p.93 Vol. 3 Proceeding of the 4th Conference of Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Madison 1971
- (4) K. Miyamoto et al: "Preliminary Results Using JXB Gun and ECRH Plasma" IPPJ-102 (Nov, 1970)
- (5) K. Miyamoto et al: "Some Engineering Aspect of JIPP Stellarator" IPPJ-T-8 (Apr, 1972)
- (6) 宮本「JIPPステラレータ装置に関する技術的記述」IPPJ-DT-36 p.221 (昭48)
- (7) 藤若, 井村ほか「ヘリカルコイル ( $l=2+l=3$ ) の製作」IPPJ-DT-39 (昭48-10)
- (8) T. Dodo, A. Ogata, M. Fujiwara, K. Miyamoto "Fluctuations and Containment of Plasma in JIPP  $l=3$  Stellarator" p.121 Proceeding of European Conference on Controlled Nuclear Fusion and Plasma Physics in Moscow (1973)
- (9) M. Fujiwara, K. Kawahata, A. Mohri, K. Miyamoto "Plasma Confinement by Hybrid Stellarator Field of  $l=2$  and  $l=3$ " p.125 Proceeding of European Conference on Controlled Nuclear Fusion and Plasma Physics in Moscow (1973)