

トカマク型プラズマ実験装置“JIPP T-IIU”の完成

Completion of “JIPP T-IIU” TOKAMAK for Nuclear Fusion Research

名古屋大学プラズマ研究所第3次計画の準備研究の主装置であるトカマク型プラズマ実験装置“JIPP T-IIU”を完成した。

本装置は、トカマクとステラレータの複合装置として活躍してきた“JIPP T-II”を、R計画の準備研究の一環としてトカマク専用に変更・増力したもので、真空容器小半径を1.6倍に、プラズマ電流を約2倍にするなど、その能力を大幅に向上させた。

また、プラズマ中の不純物除去にその威力が期待されているポンプリミッタ装置を国内では初めて完成した。

本論文では、これらの装置の設計・製作に関し紹介する。

石塚達郎* *Tatsurô Ishizuka*

榎本 孝* *Takashi Masumoto*

1 緒 言

準定常プラズマ実験装置“JIPP T-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51年に稼動を開始した装置¹⁾で、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トラスとして建設された。

この装置では、数々の研究成果が得られたが、複合装置であるための空間的条件から、ポートの大きさ、数などについての制約があった。

このため、名古屋大学プラズマ研究所の第3次計画準備研究の主装置として、装置の改造・増力を行ない、昭和58年に、トカマク型プラズマ実験装置として運転を開始した。

改造の主眼はR計画(Reacting Plasma Project)の準備研究であるので、プラズマ電流の増大及びポート数、ポート寸法の増大のために、主として真空容器、変流器周りの改造・増力を行なった。

2 改造の目的と背景

名古屋大学プラズマ研究所の第3次計画は、R計画とA計

画(Alternative Project)の2本立てで進行中であるが、“JIPP T-IIU”はR計画の準備研究のためのプラズマ実験装置として位置づけられる。

R計画は、(1)核反応プラズマの物理の解明、(2)D(二重水素)-T(三重水素)反応に対処できる各種技術及び総合装置技術の確立を目的としている装置²⁾であり、昭和56年から精力的な設計作業が名古屋大学主導の下に実施されている³⁾。

R装置設計作業は、従来からのステンレス系装置としてスタートし、現在では、低誘導放射能材料であるアルミ合金を主要材料とする装置としてまとめられている。日立製作所は当初から、これらの設計作業に積極的に参加し、JIPP T-IIU製作と併せて、R計画推進に努力している。図1にR装置2次設計での本体概念図を示す。

“JIPP T-IIU”は、これらR計画装置設計作業と相補関係にあり、それぞれの成果を踏まえながら研究が進められているが、主として、

- (1) 高周波によるプラズマ電流立上げ・駆動の研究
- (2) 高周波によるプラズマ加熱の研究

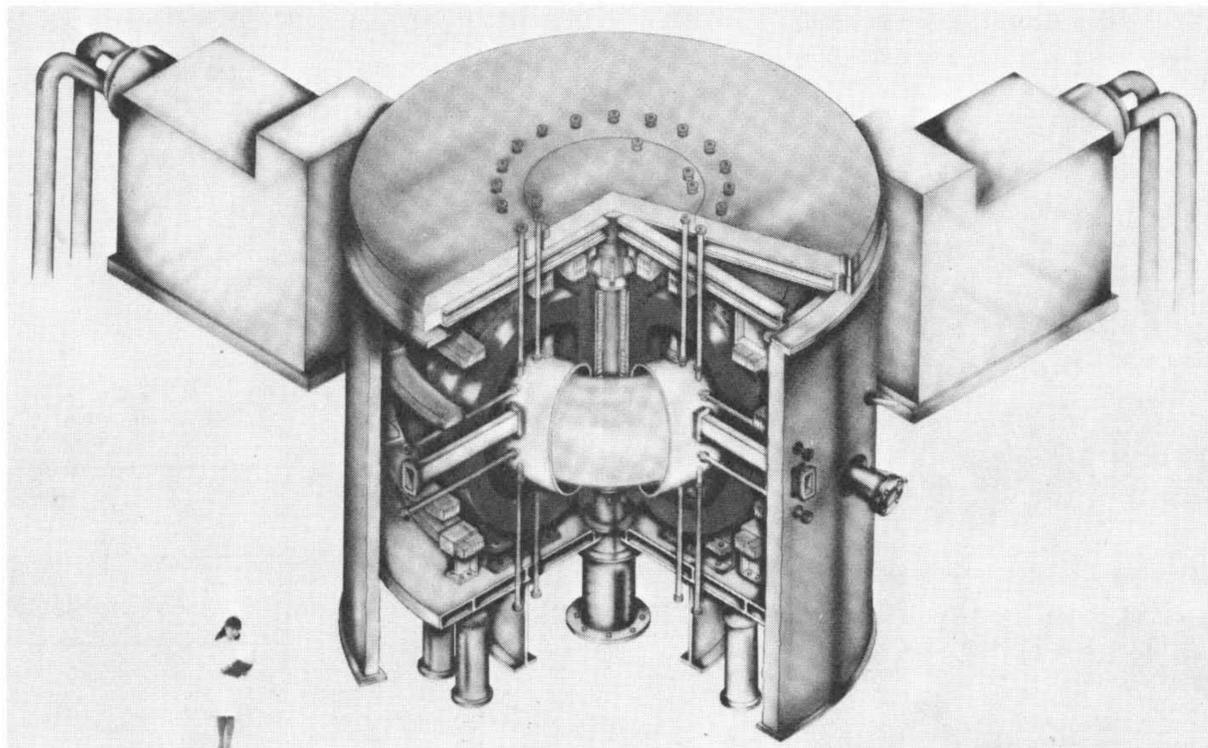
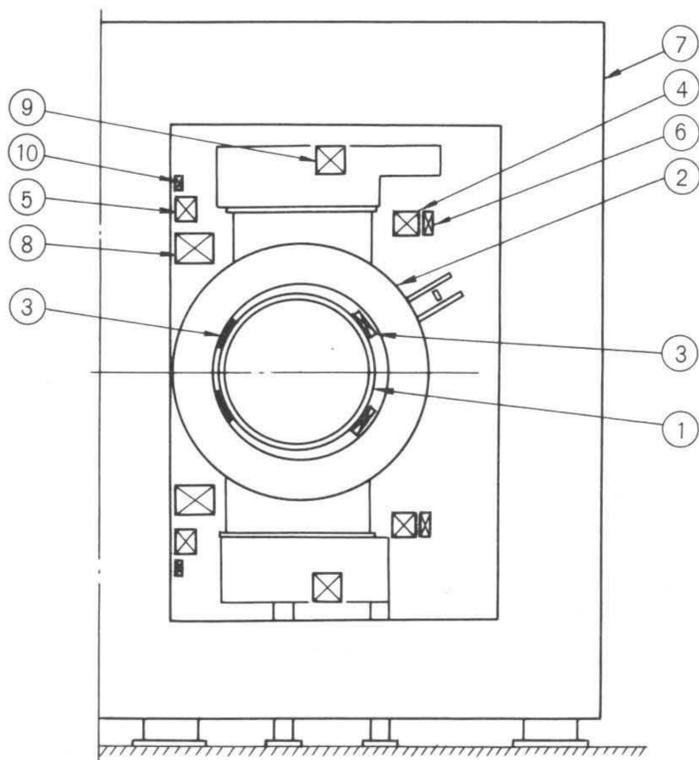


図1 R装置概念図 第2次設計でのR装置本体の概念図を示す。低誘導放射能材料であるアルミニウム合金を主要材料としたD型のトカマク装置である。

* 日立製作所日立工場

表1 本体主要パラメータ “JIPP T-IIU”本体の主要パラメータを示す。プラズマ副半径，プラズマ電流，鉄心有効磁束とも改造前に比べて大幅に増加している。

項目	JIPP T-II	JIPP T-IIU
主半径	0.91m	0.91m
副半径	0.17m	0.23m
トロイダル磁場	3T	3T
ヘリカル磁場	$l=2, m=4$ トラス全周	$m=3, n=1$ トラス方向30度, 2箇所
鉄心有効磁束	0.45V·S	0.8V·S
プラズマ電流	160kA	300kA



No.	名称	No.	名称
①	真空容器	⑥	水平磁場コイル
②	トロイダル磁場コイル	⑦	鉄心
③	フィードバック型垂直磁場コイル	⑧	変流器一次主コイル
④	直流型垂直磁場コイル	⑨	変流器一次補助コイル
⑤	巻戻しコイル	⑩	バイアスコイル

図2 本体装置構成図 “JIPP T-IIU”本体装置の構成を示す縦断面図である。変流器一次主コイルの配置変更，補助コイルの追加によって変流器機能を増強した。

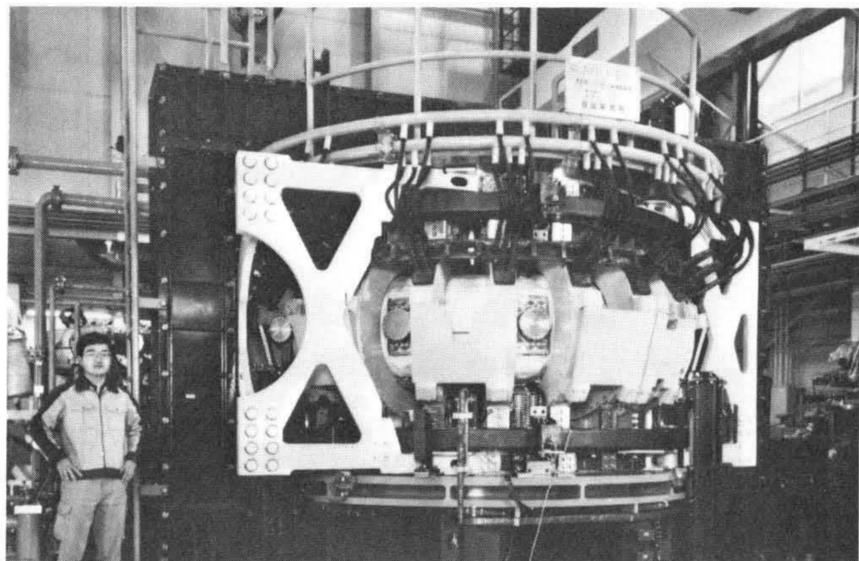


図3 “JIPP T-IIU”の外観 “JIPP T-IIU”本体部の外観を示す。トロイダルコイルの間に，長方形の真空容器ポートフランジが見える。

- (3) 大電力高周波加熱時のプラズマ-壁相互作用の研究
 - (4) プラズマ計測技術の研究
- がその課題とされている。

3 装置の概要

これらの目的を達成するために，(1)真空容器断面の大型化，(2)ポート数増加及びポート寸法の大型化，(3)変流器磁束の増力などを行ない，プラズマ電流の増加，高周波加熱用アンテナ設置を可能にし，併せて，局所ヘリカルコイル設置による不純物制御の研究も可能とした。

本体の主要パラメータを表1に，装置構成を図2に，外観を図3に示す。

4 真空容器

図4に示すように，真空容器断面を大型化したことに伴い，空間上の制約から真空容器には，(1)プラズマ制御用シェルとしての機能，(2)フィードバック型垂直磁場コイル支持体としての機能，(3)局所ヘリカルコイル支持体としての機能，などが必要となった。

このため，真空容器は図5に示すように二つの厚肉部と二つのベローズ部を交互に配した構造とした。ベローズ部上には局所ヘリカルコイルを設置する巻棒を配置して，厚肉部と機械的に結合したため，真空容器としてはトロイダル方向に剛な構造となり，フィードバック型垂直磁場コイルの設置が可能となった。

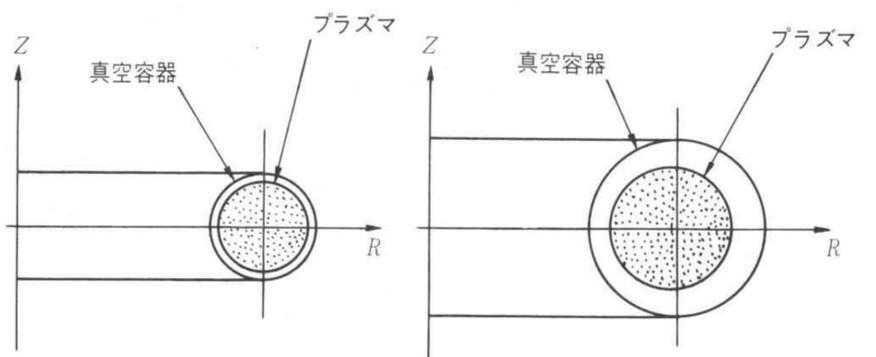
真空容器は，脱ガス処理のため電気ヒータによって150°Cにベーキングされるため熱膨張するが，真空容器を剛な構造としているので，この支持は半径方向には剛性の小さな8本の支持脚を用いて行なった。

ICRFアンテナ，大型リミッタなどの搬入及び内部での作業が可能ないようにポートの寸法を大型化したことにより，真空容器内の部品の取付・交換が容易になり実験のフレキシビリティが飛躍的に向上した。また，ポート部の真空シールは，従来から実績のある銀めっき金属Oリングを用いて行なっているため，良好な真空性能が得られている。

図5に真空容器の単体組立状況を示す。

一方，真空容器の内部には，プラズマと壁の相互作用を調べるために各種のリミッタが取り付けられる構造となっており，タイル状のバンパリミッタや図6に示すカーボン製ポロイダルリミッタが設置されている。

表2に真空容器の主要パラメータを示す。



(a) “JIPP T-II”

(b) “JIPP T-IIU”

図4 真空容器壁とプラズマの位置関係 真空容器断面の大型化に伴い，真空容器壁とプラズマの間に，高周波加熱用アンテナなどの設置が可能となった。

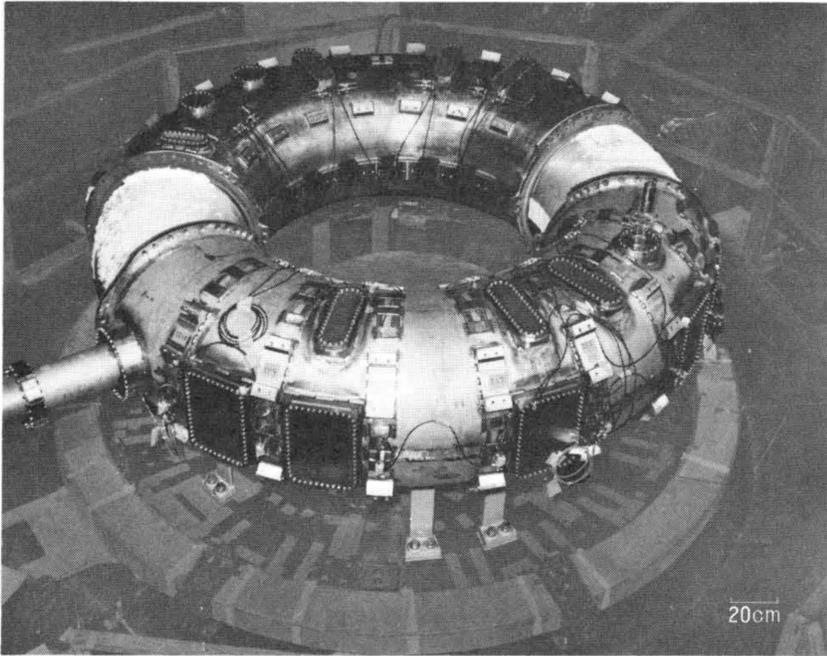


図5 真空容器の外観 “JIPP T-IIU”の真空容器外観を示す。ペローズが、2箇所配置されており、トーラス外周側には大形の長方形ポートが設けられている。

表2 真空容器パラメータ アスペクト比2.9の太い真空容器である。二つの厚肉部(板厚25mm)の設置により、真空容器自体にシェル機能をもたせている。

項目	仕様
断面形状	丸型
主半径	0.93m
副半径	0.32m
材質	SUS304
材厚	25mm
内容積	2 m ³
ポート総数	30 個
真空シール方式	メタル中空Oリング
一周抵抗	1mΩ(ペローズ2個)
ベーキング温度	150℃

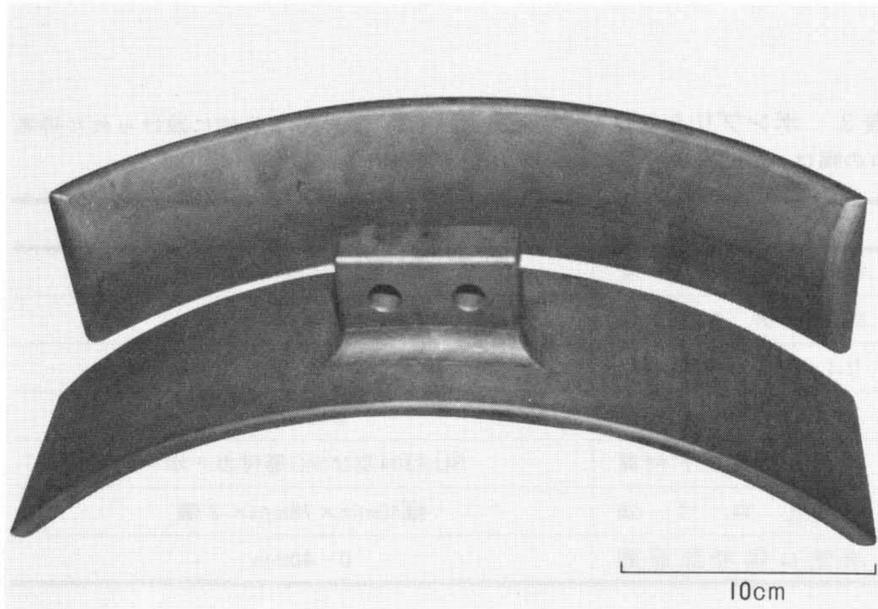


図6 カーボン製ポロイダルリミッタ 稠密質黒鉛製の大型リミッタを示す。プラズマを囲む形でトロイダル方向に2組み設けられている。

5 フィードバック型垂直磁場コイル

プラズマの制御性と電源容量の節約の点から、フィードバック型垂直磁場コイルは、トロイダル磁場コイルより内側に設けられるが、空間的制約から専用支持体が設けられない。このため、真空容器から支持する構造とした。

コイルに発生する電磁力を支持するためには、真空容器に剛に取り付けることが望ましいが、真空容器のベーキング時には、その熱変形に追随し熱応力を発生する。そこで、電磁力による応力と熱応力と両方を勘案し、どちらの場合にもコイル絶縁に過大なひずみが作用しないようにするため、コイルは適切なばね定数をもつ弾性支持体を介して真空容器から支持する構造とした。

6 変流器

変流器は、鉄心、一次コイル及びバイアスコイルから構成される。従来は、トーラス中心部の脚鉄の上下部に一次コイルを設けて、変流器磁束を発生させていたが、一次コイル設置位置での鉄心の局所飽和現象により、有効磁束に限界があった。改造目的を達成するために、有限要素法による磁界解析コ

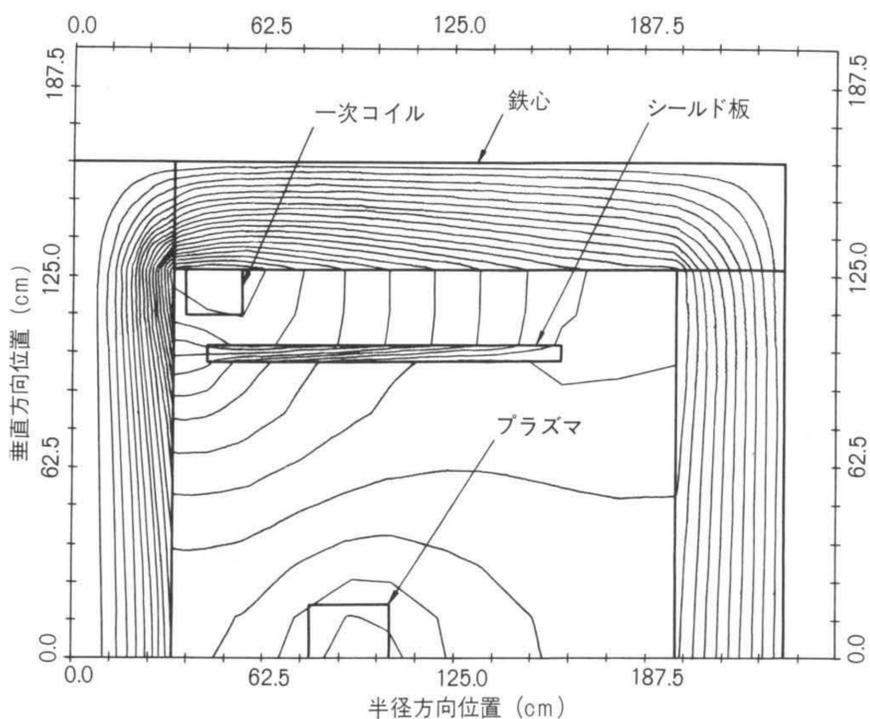


図7 変流器解析結果の例(改造前) 一次コイル設置部で磁力線が密になっていることが分かる(プラズマ電流134.8kA, 一次コイル213.1kATの場合の解析結果を示す)。

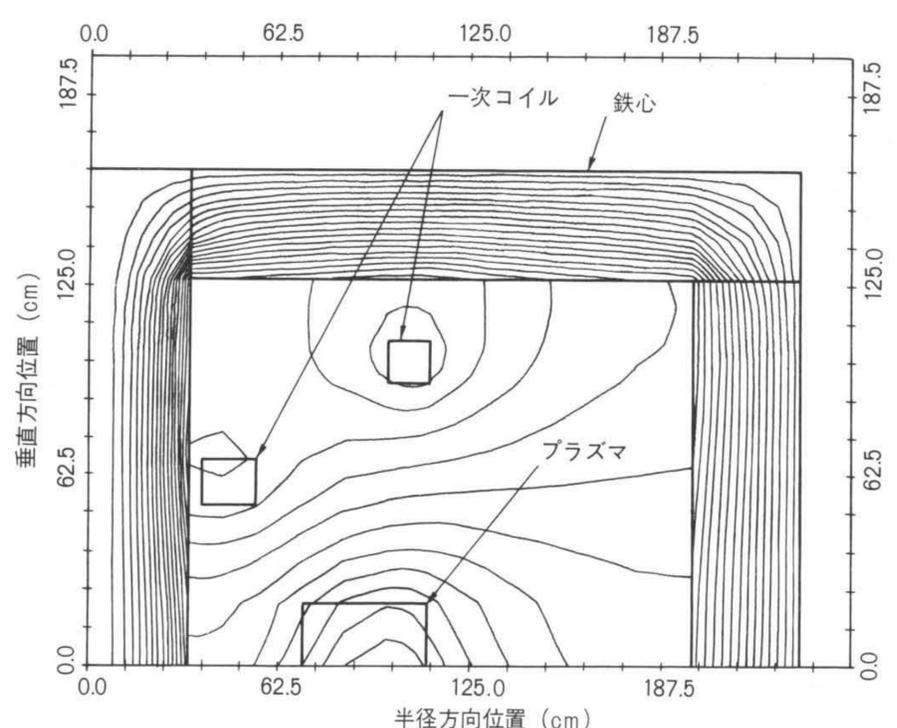


図8 変流器解析結果の例(改造後) 改造前に比べて赤道面での磁束が増加していることが分かる(プラズマ電流300kA, 一次コイル380kATの場合の解析結果を示す)。

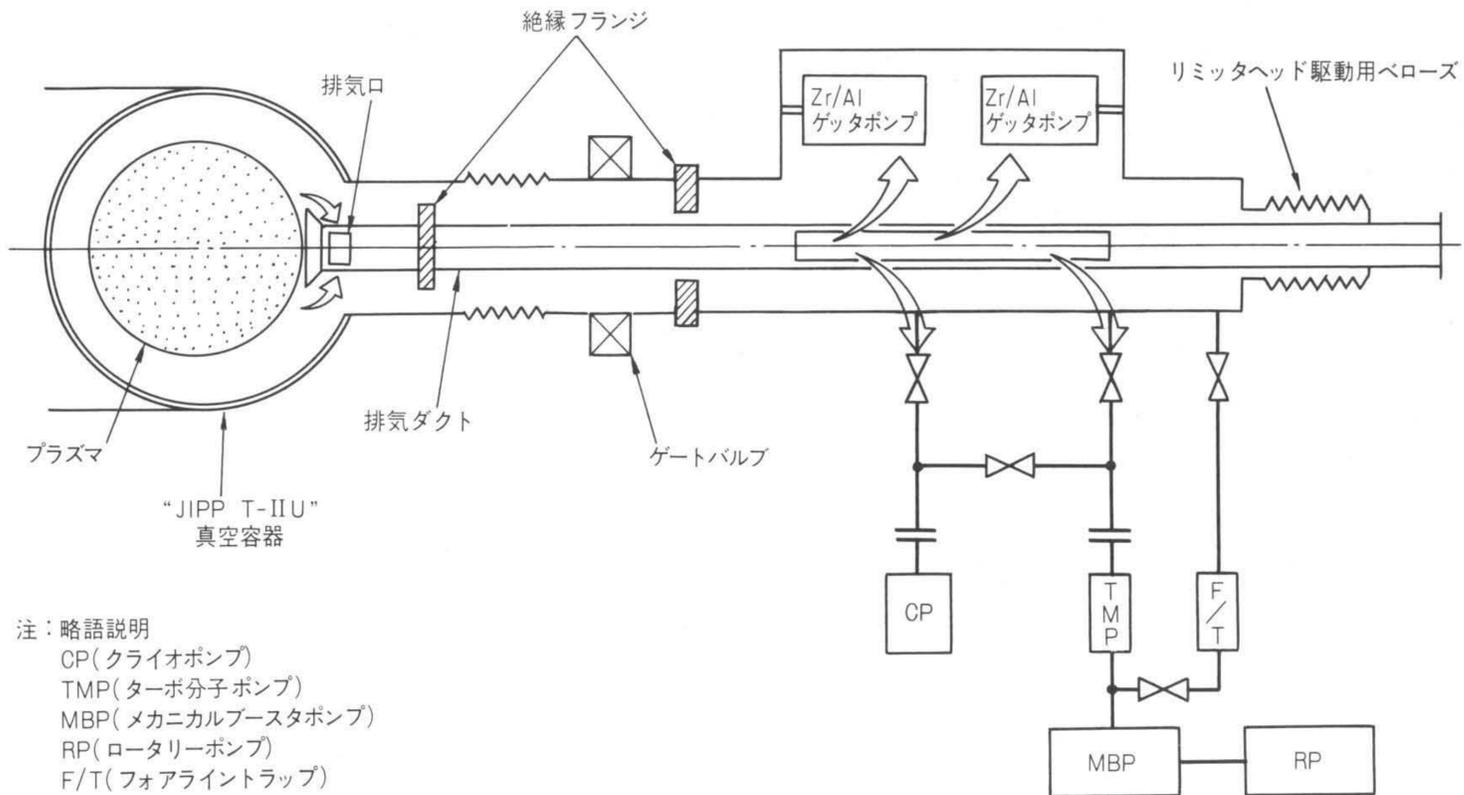


図9 ポンプリミッタ系統図 ベローズを伸縮させ、リミッタヘッドをゲートバルブの外側に移動させることにより、真空容器の真空を破らずにリミッタヘッドを交換できる。ポンプ類は、名古屋大学で取り付け使用される。

ードを用いて、鉄心の効果を考慮して種々検討を行なった結果、脚鉄の上下付根部にあった一次コイルを赤道面側に移設するとともに一次コイルを一組み増設することで、プラズマとの結合性を向上させ変流器機能の増強を図った。

本改造により、電源設備に手を加えずに有効変流器磁束が0.45V・Sから0.8V・Sへと約1.8倍に増大し、プラズマ電流も160kAから約2倍の300kAへ増加することができた。

改造前後での解析結果を図7、8に示す。

7 ポンプリミッタ

プラズマの不純物制御研究と第一壁との相互作用研究の2点を主目的とし、ポンプリミッタが設けられた。ポンプリミッタを用いることにより、磁気ダイバータなしに不純物除去ができれば、核融合炉の単純化が可能となり、経済性の向上にもつながるため、海外でも実験的研究が企画されている。我が国ではまだその例がなく、本装置を用いた実験の成果が期待される。

具体的設計に当たっては、ポンプリミッタ排気機構及びリミッタへの熱負荷と排気効率の関係を明らかにするため、

- (1) 各種排気装置の設置が可能なこと。
- (2) リミッタヘッドの両側にそれぞれ排気口を設け、真空を破らずにその幅が各々独立して変えられること。
- (3) ゲートバルブを閉じることにより、トラス本体の真空を破らずにリミッタヘッドを交換できること。

などを考慮した。

また、リミッタヘッド材として、コンバージョン法⁴⁾により表層を約0.8mmSiC化したカーボンを用いる点の特徴である。これは、従来から行なわれているTiCコーティング膜では困難であった強固な層をもっている点、及び炭素ブロック状態で成形加工が可能なことから、SiC焼結体にはなかった好加工性をもっている点などで有利である。

このほか、リミッタヘッド材の交換が容易な特徴を利用し、良好な第一壁材が開発されることも期待される。

図9にポンプリミッタ系統図を、表3にポンプリミッタの設計要目を示す。

表3 ポンプリミッタ設計要目 リミッタヘッド近傍に設けられた排気口の幅は、真空を破らずに変えることが可能である。

項目	仕様
排気速度	約1,000l/s(H ₂ に対して)
排気ダクト径	φ110mm
リミッタヘッド可動範囲	トラス中心から1,080mm~2,050mm
リミッタヘッド径	φ160mm
リミッタヘッド材質	SUS304及びSiC層付カーボン
排気口寸法	幅40mm×78mm×2個
排気口幅可変範囲	0~40mm

8 結 言

トカマク型プラズマ実験装置“JIPP T-IIU”は、昭和58年予定どおり建設を完了しその後順調に稼動しており、名古屋大学プラズマ研究所を中心とする研究陣により、数々の注目すべき成果が得られている。

また、成果の一部は、既にR計画などの設計に反映されており、今後ますます、その存在意義を高めていくと期待される。

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教授・松浦清剛工学博士、藤田順治理学博士、浜田泰司理学博士、同所助教授棚橋秀悟工学博士、東井和夫工学博士、北川史郎工学博士、松岡啓介工学博士、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) 伊藤, 外: ステラレータ・トカマク型実験装置“JIPP T-II”の完成, 日立評論, 62, 5, 325~330(昭55-5)
- 2) 名古屋大学プラズマ研究所: 核反応プラズマ実験計画とその準備研究, プラズマ研便り, 1, 3~12(昭59-1)
- 3) 名古屋大学プラズマ研究所: 核融合反応プラズマ実験装置技術報告[I~VI]
- 4) 愛場, 外: コンバージョン形炭化ケイ素~カーボン複合材, 日立評論, 63, 4, 249~252(昭56-4)