臨界プラズマ試験装置"JT-60"本体の建設 Construction of "JT-60", a Plasma Feasibility Experiment Device

核融合実用化に現段階で最も近いと考えられている、トカマク型の大型核融合装置である臨界プラズマ試験装置 "JT-60"の建設が、日本原子力研究所によって進められている。日立製作所は、炉心に相当する "JT-60"本体をはじめ、主要部分を受注している。

本論文はその製作、組立技術を中心にまとめたものである。

"JT-60"本体に関しては,現在,機器の製作を完了し,現地で建設の最終段階を 迎えている。本体を構成する真空容器,各種磁場コイルの大電流,強磁場,高温へ の耐力は工場でのシミュレーション試験により確認されており,現地組立にもそれ らを反映した組立精度が随所に生かされている。

また、本体制御設備は、マイクロコンピュータ内蔵 CAMAC システムを主体としたもので、"JT-60" 全系との連携も図っている。

太田		充*	Mitsuru Ôhta
清 水	ΞĒ	亜**	Masatsugu Shimizu
大久的	呆	実**	Minoru Ohkubo
古山	昌	之***	Masayuki Furuyama
石塚		裕***	Hiroshi Ishizuka
森田	隆		Takamasa Morita
伊藤		裕***	Yutaka Itô
鈴木	勝	美****	Katsumi Suzuki
射場	大	诰****	Daizô Iba

11 緒 言

臨界プラズマ試験装置"JT-60"は、日本原子力研究所が建設を進めている核融合エネルギー開発を目的とした装置であり、昭和60年の完成を目指して茨城県那珂郡那珂町の核融合

表 | "JT-60"基本性能諸元 プラズマの大きさ, 温度など, いずれも 世界を代表する値である。

TT	P	3ktr	(古	
- 只		女义	门旦	

研究センターで、着々と工事が進められている1)。

"JT-60"の建設は、昭和48年から概念設計、予備設計など が進められ、昭和50年から詳細設計と研究開発が実施され た^{2)~4)}。その成果に基づき、実機の製作が昭和53年から開始さ れ、"JT-60"本体に関しては、機器の製作⁵⁾が完了し、現地で 建設の最終段階を迎えている。日立製作所は、本体のほかに 全系制御設備、プラズマ加熱用中性粒子入射加熱装置、加熱用発 電設備、計測共通設備などの主要設備のほか、"JT-60"全体業務 の円滑な運営を図る目的の総合調整業務も受注している。

本論文では、"JT-60"本体を中心に、その建設状況について報告する。

2 "JT-60"の概要

"JT-60"は、プラズマの加熱に費やされるエネルギーと、 核融合反応により放出されるエネルギーが等しくなる状態、 いわゆる臨界プラズマに相当する条件を達成するためのトカ マク型核融合装置である。本装置の基本目標は、水素プラズ マでイオン温度数千万~1億度、密度2~10×10¹⁹ m⁻³、閉じ 込め時間0.2~1秒の物理量をもつ臨界プラズマの諸特性を実 験的に究明し、かつ炉心プラズマに匹敵するプラズマ運転技術 を積み重ねることにより、将来の核融合炉への具体的な足がか りとすることである。表1に本装置の基本性能諸元を示す。

"JT-60"は、臨界条件と等価な物理量をもつプラズマを閉 じ込める本体を中心に、各種電源設備、加熱設備、計測設備、 各種補機類及び制御設備から成る一大システムを構成してい る。これらの機器は約20の建屋に収められる。日立製作所は 各種機器の受注製作のほか、これらの機器の配置、工程調整、 試験調整などのプロジェクト推進のソフトウェア業務である

トーラス半径(主半径)	<i>R</i> ∶3.0m
断 面 半 径(副半径)	a:0.95m
アスペクト比	R/a:3.16
トロイダル磁場	4.5T
プラズマ電流	2.7MA
同上継続時間	5~10s
粒子入射加熱入力	20MW
高周波加熱入力	IOMW
イオン温度	5~IOkeV
密度	$(2 \sim 10) \times 10^{19} m^{-3}$
閉じ込め時間	0.2~Is

"JT-60"の特徴は,純度の高いプラズマの生成を可能とし, プラズマの不純物制御をするため,真空容器中に設置された 3個の磁気リミタコイルにより,プラズマと壁面が直接作 用し合う点を遠ざけることができる磁気リミタ配位運転が 可能である。更にプラズマにさらされる第一壁表面には,低 原子番号材である炭化チタンコーティングを採用している。

本体関係の主要機器の諸元を表2に示す。

3 "JT-60"本体の建設

"JT-60"本体の建設は、工場で製作、試験を完了した各機器を現地で組み立て、総合機能試験を実施する最終段階を迎えている。以下、主要構成機器の建設状況について述べる。

3.1 真空容器

真空容器は、内部にプラズマを発生させる超高真空の卵形

15

「JT-60製作にかかわる総合調整業務」を担当している。図1 断面をもつトーラス状容器であり,真空力,500°Cの熱変形, に"JT-60"の構成をブロックで示す。 熱応力及びループ電流,くら形電流,磁気リミタ反力など, 図2は"JT-60"の本体及び周辺を鳥観したものである。 大きな荷重を受ける過酷な仕様の構造物である。容器の材料

* 日本原子力研究所核融合研究センター 工学博士 ** 日本原子力研究所核融合研究センター *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所大みか工場 646 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)



注:略語説明 RF(Radio Frequency:高周波), MG(電動発電機)

図 | "JT-60"構成ブロック図 "JT-60"は、本体を中心に各種周辺装置、電源、制御装置などから成る一大システムである。



図2 "JT-60"本体周辺鳥観図 トーラス型の本体の周りに,第2段加熱装 置である中性粒子入射加熱装置及び高周波 加熱装置が配置されている(日本原子力研 究所提供)。

は、ニッケル基超合金のインコネル相当材で、厚さ65mm、単

内面には,世界の他の大型トカマク装置に例を見ない,磁 気リミタコイルが設置されており,またプラズマからの真 空容器保護用第一壁が設置されている。

位重量3日以上の厚板が新しく開発され, 採用された。また
真空容器は, 寸法及びプロフィルに関し, 極めて高度な精度が要
求されるため、できるだけ一体成形を採用するとともに、110kW
大出力電子ビームによる溶接法が広範囲に採用されている。
分割部の接合面,ベローズとの接合面は、すべてNC(数値
制御)中ぐり盤によって加工され,接合時の誤差を最少限に抑
えている。

16

磁気リミタコイルは、3グループ(主磁気リミタ、副磁気 リミタ×2)で構成されており、真空封じ切りのため厚肉リ ングとベローズで交互に接続された外筒に収納されている。 コイルと厚肉リング間は、セラミックを介した特殊なスライ ド機構を内蔵し、熱絶縁、電気絶縁、荷重支持を兼ねている。

表 2 本体関係主要機器諸元¹⁾ 材料,温度,真空度など各所に「超」技 術を折り込んだ諸元である。

機	器	項目	1	諸元
	古	材	料	インコネル相当材
	异	構	造	ベローズと厚肉リングの複合体
	포	形	状	9 P 形
	合肥	到 達 真 空	度	IO ⁻⁸ Torr以下
真	石 合	ヘリウムリー	ク量	5×10 ⁻⁷ Torr l/s以下
	本 (十	ベーキング	温度	500℃
	14	ターン電気	抵抗	1.3mΩ以上
空	ラ	材	料	モリブデン
	17	ラ イ	ナ	厚さ5mmの平板若しくは曲面板
	」」	傳 固定 リミ	ミタ	変断面中実棒
容	気リ	逗 磁気リミ	タ板	厚さ20mmの平板
	ミタ	放電開始前	温度	室温から400℃までの温度
	ダ・板	ベーキング	温 度	約500℃
器	ポート	種	類	プラズマ計測ポート,真空排気ポート, プラズマ加熱ポート,予備電離ポート, ガス注入ポート,可動リミタ引抜ポート, 半固定リミタ挿入用ポート,電磁気計測 検出器引出ポート
		起磁	カ	67.5MAT
1	•	フラットトップ	時間	5s
F		運転周	期	IOmin
-	ſ	リップ	ル	0.5%以下
2	¥	個	数	18
,	L	ターン	数	個当たり72ターン
石	襚	主 半	径	3,320mm
뉮	易勿	内半	径	1,940mm
- 		板	厚	880mm
-	ſ	導	体	強制冷却水路をもつ平角導体
J	L	最大電	カ	340MW
	-	磁気エネルギ	F -	2.8GJ
		通電発熱	全重	
카	ポ コ			起磁刀/ターン数/使用最高電圧
1	í z	空心変流奋口	1 12	5.5MAT/603-2/30KV
ノ	レ 点	<u> </u>		± 1.83 MAT/649 - $2/25$ KV
년 -	易	水平磁场 1 ~		$\pm 0.12 \text{MAT}/129 - 2/5 \text{KV}$
1	r L	四里極磁場コ	1 12	± 0.45 MAT/369 - $2/10$ kV
		10位 スリミダコ	1 1	
乌	2	利	村	高 マ / フ / 非磁性
	-	里	里	2,500l
4	a		1全	5111
		[D] [2]	ہ 19	2014/0/
冷	冷本		里	L 610m ³ /b
却系	14		里生	l Akg/cm ²
	次		7	14kg/cm ²
	न	取 動 邨 重	品	200kg
	-u -		里力	Im
~ ~	動	駆動陸	一問	0.1s
		** **	L I	4580mm ∨ 4
気設	真 空 排	排气声	下度	ψ 300 mm \wedge 4 13.000 $1/s(N_2)$
備		主排気ポン	、プ	トラップ及びターボ分子ポンプ
П	¥	11 2 2 2	K	は280 モリブデン板
Ξ	固	可変節	一用	$\varphi_{280} = 95 \text{ cm}$
タ	定	(副半径)	нц	
検出器	電磁気計測	種	類	磁気プロープT及びN ロゴスキーコイル ターンコイル 反磁性ループ
				茶电入



4 セクタ組立後の真空容器 図 3 4 セクタ組立後(約180度分)の真 空容器の組立状態を示す。断面の卵形が"JT-60"の特徴である。

ている。

図3に真空容器の4セクタ分(約180度組合せ)の完成状況 を示す。このほか、真空容器の内面には、 プラズマ電流や磁 場を検出する電磁気計測検出器が設置されている。この検出 器は高温での使用, 電気絶縁, 真空封じ切りなどのため, 技 術的な工夫が数多く施されている。

3.2 コイル

"JT-60"の本体コイルは、トロイダル磁場コイルとポロイ ダル磁場コイルに大別される。

3.2.1 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは、トーラス状のプラズマを安定化 させるために大円周方向の強磁界を発生させるためのコイル であり、18個のコイルから形成されている。プラズマ中心半 径3.0mで4.5Tの磁界を発生させるため, 67.5MATの起磁力 をもっている。

1個の単位コイルは、二つのパンケーキ形コイルを外径約 6mの補強枠に収納したものであり、各パンケーキコイルは冷 間圧延無酸素銅(0.2%銀入り)材をや金的に接続した36ター ンから構成されている。全体で約10万tfの向心力,約30万tfの フープ力,ポロイダル磁場による転倒力,熱応力などが印加 されるため、有限要素法の応力解析を行ない、更に実物大モ デルによる実荷重模擬試験を実施し, 信頼性を確認した。

トロイダル磁場コイルの製作は、半周ごとに導体を継ぎ合 わせて巻き付けてゆくが、冷却管用の溝が切られており、こ れはあらかじめ直線状態で切られたものを曲げ加工する方式 を採用した。その他種々の新技術が開発採用されたが、

(1) 大容量高周波ろう付機の開発と最適ワークコイルの確立

- (2) 大断面接続用新ろう材の開発
- (3) 自動超音波探傷装置の開発による全面検査の実施
- (4) 高強度, 高耐電圧絶縁法の開発
- などにより、信頼性の高い技術を確立した。図4に完成した コイルの外観を示す。

17

真空容器のベーキング時,磁気リミタ厚肉リング表面は約250°C 3.2.2 ポロイダル磁場コイル になるが、コイル外周に水冷パイプを配置し、コイル自体は ポロイダル磁場コイルは、 プラズマ小円方向の磁界を生じ 約70°Cに抑えている。 させ、 プラズマの発生、制御を行なうための電流を流すため 第一壁は、約9,000枚のモリブデン、及びインコネル材の に大円周方向に巻かれたコイルである。このコイルは空心変 リミタやライナなどから構成されている。プラズマ対向面は, 流器コイル, 垂直磁場コイル, 水平磁場コイル, 四重極磁場 高純度プラズマ形成のため,大形特殊ライナ材に対する炭化 コイル、磁気リミタコイルから成る。空心変流コイルの起磁 チタンコーティング技術が開発され、低原子番号化が図られ 力は5.5MATで、使用最高電圧は30kV にも達する。

648 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)



構造上,真空容器とトロイダル磁場コイル間の狭いスペースに設置されるため,接続と組立を併行して進める必要がある。

特にこのコイルは,高強度,高耐電圧絶縁を要求されるため,実寸法導体モデルによる四点曲げ疲労試験,実荷重試験 を実施し,信頼性を確認した。新作業技術として,

(1) 大断面銅導体接続用, 大電流パルス TIG (タングステン 不活性ガス) 溶接法の開発

(2) 高耐圧, 高耐ひずみ絶縁法の開発

(3) 大断面接続部超音波探傷技術の開発

などがある。また、このコイルを狭あい部に組み込む方法として横置き状態で組み込み、全コイルをコイル支持枠に組み込み後、倒立する特殊組込方式を開発した。また、接続作業者は6箇月以上の訓練の上認定した。完成した内周コイルを図5に示す。

3.3 本体補機

3.3.1 真空排気設備

真空排気設備は、ターボ分子ポンプによる主排気系を主体 とする排気系で、排気系単独では 1×10^{-10} Torr 以下の到達 真空度を得ている。真空容器は、トーラスの180度の位置に各 各上下2箇所、合計4箇所に設けたマニホールドから、内径 540mmのアルミナセラミックによる絶縁フランジを介して接 続されている。真空容器の排気孔での実効排気速度は1万 3,000 l/s をもち、真空容器を 1×10^{-8} Torr 以下に排気する。

図 4 完成したトロイダル磁場コイル I個当たり100tに近い重量を もつ。



図6に、1個のマニホールドに接続される排気系統を示す。 主ポンプ(公称排気速度3,500 l/s)の上流には、口径400mm のオールメタルゲート弁と液体窒素トラップが取り付けられ、 背圧側には、水素に対する圧縮比を増加させるため小型(公 称排気速度450 l/s)のターボ分子ポンプが設けられている。 また、真空容器の大気開放をできる限り避けるため、主排気 系停止時バックアップするスパッタイオンポンプによる保守 排気系が設けてある。

3.3.2 可動リミタ, 半固定リミタ

プラズマの断面を制限するリミタとして,真空容器内面に 取り付けた固定リミタのほかに,可動リミタと半固定リミタ がある。

可動リミタは、プラズマ電流立上げ時にプラズマ電流の 表皮効果を防止するため、上下一対に設けた高速可動のリミ タである。高圧の油圧サーボ系により、プラズマ着火直前 に上下リミタ間隔を極小に設置しておき、約1mのストロー



図5 ポロイダル磁場コイル 内周側ポロイダル磁場コイルを,横置き で組み込み, 倒立したところを示す。

18

図 6 真空排気設備系統図 ターボ分子ポンプ(3,500 l/s)を主ポンプ とする排気系である。

臨界プラズマ試験装置"JT-60"本体の建設 649

クをプラズマ着火と同期して0.1sで引き抜くものである。真空中でのしゅう動部には二硫化モリブデン製軸受,真空シール機構には長連の溶接ベローズを用いている。

半固定リミタは,あらかじめリミタ位置を固定しておき, プラズマの断面半径を制限する働きをするもので,可動リミ タと同一セクションに斜めに上下一対設けられている。

3.3.3 本体一次冷却系,真空容器ガス冷却系

本体一次冷却系は、本体のコイル及び真空容器の除熱のための純水冷却系である。系統は循環系及び水質を確保するための精製系、純水製造のための純水製造装置から構成されている。全流量1,610m³/h,全除熱量平均20MWの能力をもつ。

真空容器ガス冷却系は,高温状態での真空容器及び磁気リ ミタ板を冷却するための設備で,ビームリミタ板の冷却に も使用される。除熱能力を高めるため,窒素ガスを5気圧に 加圧し循環させている。

3.4 本体制御設備

本設備は、トカマク装置本体の監視、保護及び本体の付属 設備であるベーキング電源、真空排気設備、可動リミタな どの監視制御を行なう制御システムであり、マイクロコンピ ュータ(HIDIC-08L)を使用した CAMAC (Computer Automated Measurement and Control)システム及び中央制御盤、 現場制御盤、保護インタロック盤などから構成されている。 システムの構成を図7に、また中央制御盤の外観を図8に



図8 本体制御設備中央制御盤の外観 中央制御盤は,操作デスクと 直立盤から構成され,本体各機器の統括監視制御を行なう。

(Cathode Ray Tube)表示装置を組み込んだ計算機化制御盤とし、コンパクトな設備により、本体各機器の集中監視操作が行なえるようにしている。

(3) 中央(制御棟)と現場(実験棟)間の情報伝送には, CAMAC ハイウエイによる多重信号伝送を採用するとともに, 建屋間

示す。

本システムの主な特長を以下に述べる。

(1) トカマク装置本体を中心とした大量のプラント情報のモニタ,放電シーケンスに従った真空容器のベーキング制御,可動リミタ制御,放電時の特性解析データの収集などを行なうため,マイクロコンピュータ内蔵CAMACシステムを採用している。

また全系制御設備とのリンケージには、CAMAC規格による標準インタフェースを採用している。

(2) 中央制御盤の操作デスクは, CAMAC システムの CRT

の信号伝送には光ファイバケーブルを使用し,強電磁場環境での耐ノイズ性能及び絶縁性能を確保している。

(4) 保護インタロックシステムは,信頼性の高いハードワイ ヤード方式とするとともに,重要な情報のモニタにはCAMAC システムとは独立した,STU(光信号伝送器)を使用し,設備 の安全性,保全性を確保している。

(5) 放電時の特性解析データの収集には, CAMAC システム に内蔵した高速トランジェントレコーダ及び高精度タイミン グシステムを使用し,放電制御に同期して高速データ収集が 行なえるようにしている。

19

図7 本体制御設備のシステム構成 トカマク装置本体とその付属設備の制御装置から構成され、制御棟と実験棟に設置される。建屋間の信号伝送には光ファイバケーブルによる多重信号伝送を採用している。

650 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)

3.5 現地組立, 試験

"JT-60"本体の据付は,昭和58年2月から開始された。

"JT-60"本体の構造上の特徴は、トロイダル磁場コイルの 内側にポロイダル磁場コイルが置かれている点にある。トロ イダル磁場コイルとの関係及び輸送上の制限から、真空容器 及び大口径のポロイダル磁場コイルについては、180度セクタ まで工場で組み立て現地に搬入した。現地組立は、真空容器 及びポロイダル磁場コイルを、トロイダル磁場コイルを挿入 する1箇所(分解部)を除き設定した後、トロイダル磁場コ イルを挿入し所定の位置に回し込む方法を取った。真空容器 から外部に引き出される計測用あるいは加熱用ポートの溶接 作業は、トロイダル磁場コイルの挿入と交互に進められた。 分解部は全18個のトロイダル磁場コイルを設定した後、狭空 間で高電圧コイルであるポロイダル磁場コイル導体の溶接及 び絶縁処理作業、並びに磁気リミタコイル保護管の溶接及び 真空容器の分解リングの溶接が行なわれた。

この間,真空容器内部では第一壁の取付,電磁気計測検出器の設定が並行して進められた。

図9に、大物部品据付の最終段階である上架台の組立状況 を示す。

品質上特に重要であるコイル及び真空に関する組立箇所は, 全数にわたって組立途上検査を実施して,信頼性を確認しな がら作業を進めた。ポートについては全数部分真空排気によ り,溶接部のヘリウムリーク試験を実施した。

表 3	現地調整試験項目	実運転での信頼性を確認する各種試験が折り
込まれ	ている。	

区分	試験項目	内容
	各種コイル単体試験	抵抗,インダクタンス測定,絶縁耐力試験 など
本 体 調整試験	真 空 試 験	真空容器ベーキング,到達圧力測定など
	各種駆動試験	可動リミタ,半固定リミタ,ゲート弁など の駆動試験
ブロック	各設備間取合試験	電気系,冷却水系,制御系などの組合せ試 験
組合試験	コイル通電試験	トロイダル磁場コイル, ポロイダル磁場コ イルの単独及び組合せ通電試験
松合楼台	無負荷総合機能試験	制御系の総合組合せ試験
^{സ് 古 100 HE} 試 験	実負荷総合機能試験	実際の運転を想定した通電試験 各種放電洗浄モード 実験運転モード

4 結 言

据付の完了した機器から試験に入り、電力系統の取合、二 次冷却系との取合、本体制御と全系制御設備のリンケージ試 験などの、"JT-60" ブロック間の組合せ試験が実施された。

本体の据付完了後,表3に示すように真空排気,真空容器 のベーキングなどの本体調整試験,コイル電源との組合せに よる通電試験,放電洗浄,実験運転などの実際の運転状態を 模擬した総合機能試験の実施が予定されている。

図 9 "JT-60"本体の組立状況 上部架台の そが設定された状態で, トカマク全容が望まれる。 "JT-60"の建設は、世界の注目を浴びながら各種の「超」技術を駆使して進められており、完成も間近の段階にきている。 特に世界に類を見ない磁気リミタ内蔵の大型トカマクとして、その建設技術も一段と高いものが要求された。

世界的に見ても、米国の"TFTR", 欧州連合の"JET"が大型トカマクとして完成しているが、その目的とする臨界プラズマ条件への到達には"JT-60"の追上げが大いに期待されている。我が国の"JT-60"の建設が完成し、所期の成果を得、更に、実験炉建設へと人類の夢のエネルギーを求めて、今後ともなおいっそうの努力を進めてゆきたいと考えている。

最後に、本プロジェクトの遂行に当たり、多大な御指導を いただいた日本原子力研究所・核融合研究センターの礒康彦 センター所長ほか、関係各位に対し心から謝意を表わす次第 である。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所:核融合研究開発の現状, 1983年
- 斎藤,外:臨界プラズマ試験装置(JT-60)本体の試作開発, 日立評論,60,2,163~166(昭53-2)
- 3) 田村,外:臨界プラズマ試験装置(JT-60) 電源の試作開発, 日立評論,60,2,167~170(昭53-2)
- 4) 鈴木,外:臨界プラズマ試験装置(JT-60)の制御,日立評論,
 60,2,171~174(昭53-2)
- 5) 斎藤,外:臨界プラズマ試験装置"JT-60"の製作,日立評論, 62,5,349~354(昭55-5)

 $\mathbf{20}$