

臨界プラズマ試験装置“JT-60”の製作

Manufacturing of “JT-60”, a Plasma Feasibility Experiment Device

大型核融合装置「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鋭意進められており、炉心に相当する“JT-60”本体は、日立製作所が受注し、製作を開始してから2年を経過し、真空容器、各種磁場コイル、一次冷却設備、真空排気設備、架台などの設計を経て、現在すべての構成要素について製作が進行中である。

これらの構成要素は、重力に加えて大電流、強磁場によるひずみ応力や熱応力、その急激な繰返し負荷が重畳し、しかも複雑な構造に高精度の寸法加工が要求される。これに対応するため、設計では計算機を利用した高度の解析手法と各種の試作試験による実証とを行ない、また、材料面でも新しい材質を採用し、製作上でも電子ビーム溶接など最新の生産技術及び検査技術が駆使されている。

また、装置の頭脳となる制御設備では、情報処理や制御の全域にわたって各種計算機やディスプレイを階層構成と分散制御方式に従って装備し、信号伝送にも光ファイバを採用するなど、画期的なシステムが計画されている。

1 緒言

臨界プラズマ試験装置“JT-60”は、日本原子力研究所が核融合エネルギーの開発を目的として建設を進めている装置であり、昭和59年ごろに完成が予定されている¹⁾。

“JT-60”の建設は、昭和48年ごろから具体的な準備作業が進められ、昭和50年からは約1年半にわたり詳細設計とR&D(Research and Development)が実施された^{2)~4)}。実機の建設は、昭和53年から“JT-60”本体が最初に開始され、現在ポロイダル磁場コイル電源、全系制御設備の順序で設計、製作が進められている。また、全体作業の円滑な運営を行なう目的で、“JT-60”総合調整業務も日立が受注しスタートしている。

ここでは、現在日立製作所が受注している設備装置を中心に、“JT-60”の設計、製作状況について報告する。

2 “JT-60”の概要

“JT-60”はトカマク型に属する核融合装置であり、核融合動力炉実現の前提となる臨界プラズマ条件の達成を目指したものである。臨界プラズマ条件とは、核融合反応が実現するに等価な物理条件をもつプラズマの形成を意味しており、イオン温度数千万~1億度、密度 10^{14}cm^{-3} 、閉じ込め時間0.2~1sがこれに相当する。“JT-60”の基本性能諸元を表1に示す。

“JT-60”は、炉心に相当する本体をはじめとして、各種電源、補機及び制御設備をもつ一大プラントシステムである。図1に、“JT-60”の構成をブロックで示す。

装置の中心となる本体は、アスペクト比の小さいプラズマの形成と、磁気リミッタの設置及び高温ベーキングなど、不純物の対策に顕著な特徴をもっており、また、装置の制御機能の効率化を考慮して、すべてのポロイダル磁場コイルがトロイダル磁場コイルの内側に配備されている。図2に、“JT-60”本体及び周辺構成を鳥観したものを示す。

“JT-60”本体は大別して、真空容器、トロイダル磁場コ

斎藤龍生* Ryusei Saito
古山昌之* Masayuki Furuyama
佐藤 弘* Hiroshi Satō
森田隆昌* Takamasa Morita
唐津義憲* Yoshinori Karatsu
畠山 尚** Takashi Hatakeyama
村井勝治*** Katsuji Murai
射場大造*** Daizō Iba

表1 “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ことのできる値である。

項 目	数 値
ト ー ラ ス 半 径 (主半径) R	3.0 m
断 面 半 径 (副半径) a	0.95 m
ア ス ペ ク ト 比 R/a	3.16
ト ロ イ ダ ル 磁 場	4.5 T
プ ラ ズ マ 電 流	2.7 MA
同 上 継 続 時 間	5 s
中 性 粒 子 入 射 加 熱 入 力	20 MW
高 周 波 加 熱 入 力	10 MW
イ オ ン 温 度	0.5~1億度
密 度 × 閉 込 時 間	$(0.5\sim 1)\times 10^{14}\text{ s}\cdot\text{cm}^{-3}$

イル、ポロイダル磁場コイル(5種類)、架台、本体一次冷却設備、可動リミッタ、真空排気装置などから構成されている。表2に、各構成機器の主要諸元を示す。

3 “JT-60”本体の製作

“JT-60”本体の設計は、本体全体及び各構成機器のすべてについて基本設計と機能設計を完了し、製作設計図に基づいて実機の製作が進められている。

以下、主要構成機器の設計、製作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トラス状の容器であり、卵形断面をもち、厚肉リングと成形ベローズとを交互にトラス方向に配置している。内部にライナ、固定リミッタ、磁気リミッタを、外部に温度制御層、また多数多様のポートをもつという極めて複雑な形状であるばかりでなく、真空力、500°Cの熱変形熱応力及びループ電流、

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所電力事業本部 *** 日立製作所大みか工場

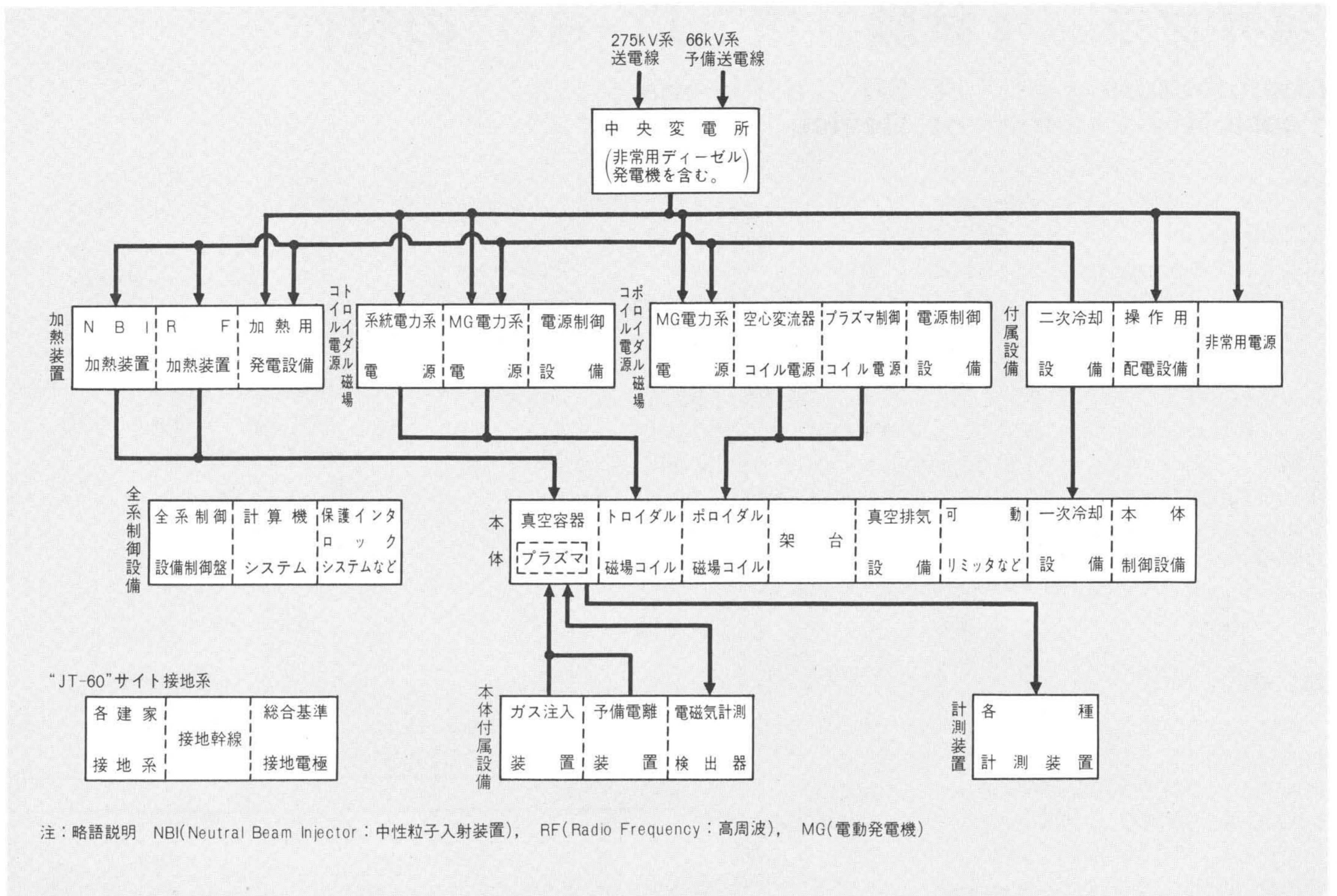


図1 “JT-60”構成ブロック図 “JT-60”は、本体を中心に各種周辺装置、電源及び制御装置から成る一大プラントシステムである。

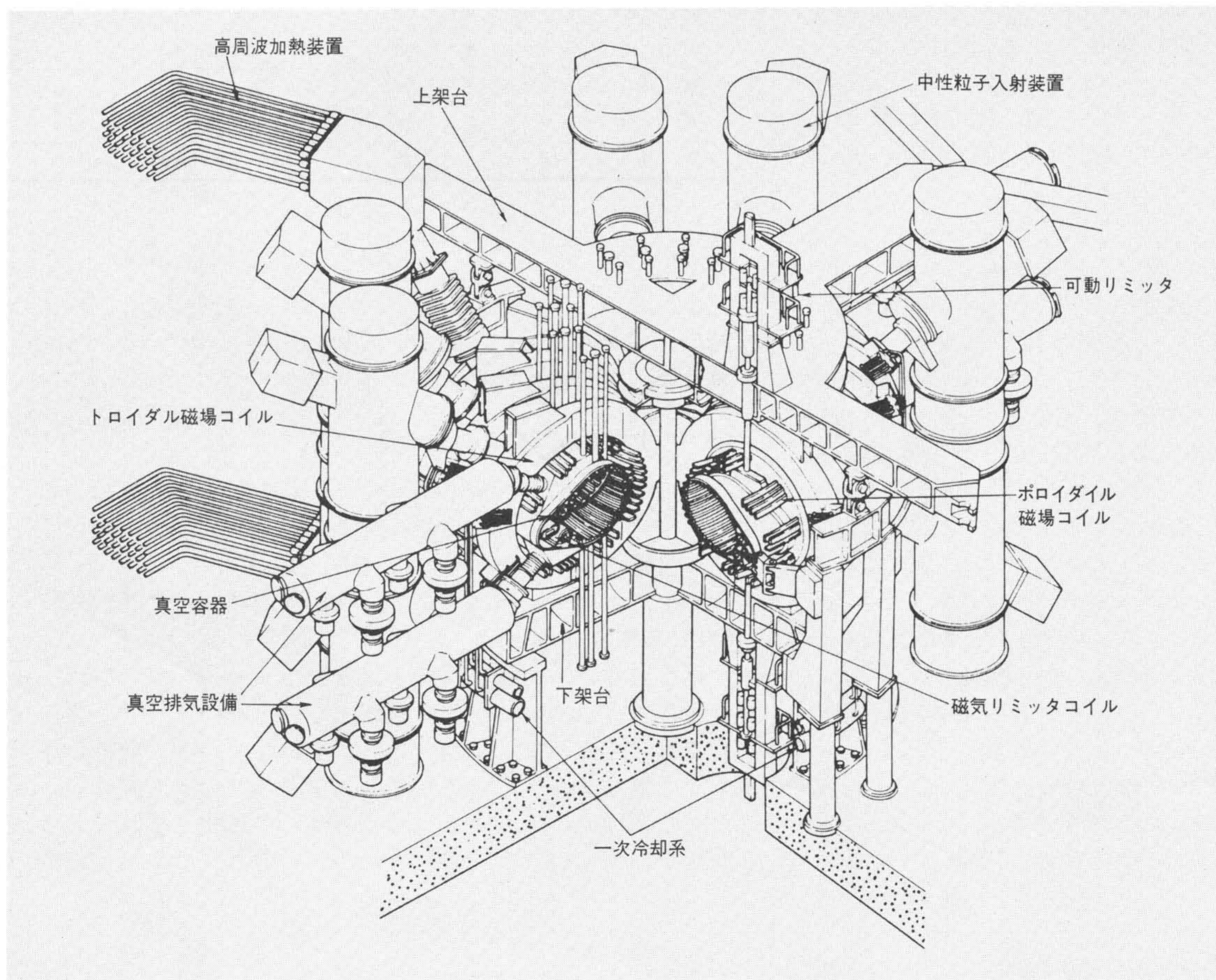


図2 “JT-60”本体周辺鳥観図 トーラス型の本体の周りに第2段加熱装置である中性粒子入射装置が配置されている(日本原子力研究所提供)。

表2 本体構成機器主要諸元 材料, 温度, 真空度など, いずれも技術の極限を追究した高度の設計である。

機 器	項 目	諸 元
真 空 容 器	真空容器本体	材 料: インコネル625 構 造: ベローズと厚肉リングの複合体 形 状: 卵 形 到 達 真 空 度: 10^{-8} Torr以下 ヘリウムリーク量: 5×10^{-7} Torr l/s ベーク温度: 500°C 1ターン電気抵抗: 1.3 mΩ以上
	ライナ・磁気リミッタ板	材 料: モリブデン 構 造: ライナ厚み5mmの平板又は曲面板 固定リミッタ変断面中実棒 磁気リミッタ板厚み20mmの平板 放電開始前温度: 室温から400°Cまでの任意の温度 ベーク温度: 500°C
	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, 可動リミッタ引抜ポート 電磁気計測検出器引出ポート
ト ロ イ ダ ル 磁 場 コ イ ル	起 電 力: 67.5 MAT フラットトップ時間: 5 s 運 転 周 期: 10 min リ ッ プ ル: 0.5%以下 個 数: 18 タ ー ン 数: 1個当たり72ターン 主 半 径: 3,320 mm 内 半 径: 1,940 mm 板 厚: 880 mm 導 体: 強制冷却水路をもつ平角導体 最 大 電 力: 340 MW 磁 気 エ ネ ル ギ ー: 2.8 GJ 1 通 電 発 熱 量: 10 GJ	
磁 場 コ イ ダ ル		起 磁 力 巻 数 最高使用電圧 --- --- --- 空心変流器コイル 5.5 MAT 60ターン 30 kV 垂直磁場コイル ±1.83 MAT 64ターン 25 kV 水平磁場コイル ±0.13 MAT 12ターン 5 kV 四重極磁場コイル ±0.5 MAT 40ターン 10 kV 磁気リミッタコイル ±0.75 MAT 16ターン 5 kV
架 台	材 料: 高マンガン非磁性鋼 半 径: 6 m 高 さ: 12 m	
冷 却 系	除 熱 量: 22 MW 冷 却 水 量: 2,250 m ³ /h 圧 力 損 失: 10 kg/cm ² 最 高 圧 力: 16 kg/cm ²	
リ ミ ッ タ 動	ス ト ロ ー ク: 1 m 駆 動 時 間: 0.1 s	
排 気 系	排 気 ポ ー ト: 直径 580 mm × 4 排 気 速 度: 13,000 l/s (N ₂) 主 排 気 ポ ン プ: トラップ及びターボ分子ポンプ	

から形電流, 磁気リミッタ反力などの大きな電磁力を受けるといふ, 過酷な仕様の構造物である。

真空容器の強度解析は, 有限要素法によって実施された。容器を構成する厚肉リング各セクタ間の形状と寸法, 支持位置の違いに対する剛性の協調, 及び厚肉リングを接合するベローズの強制変位, 発生応力, 熱応力などの低減と疲労解析について, 特に重点をおいた設計がなされた。

容器の設置される空間は極めて狭小であり, その中で最大の空間を確保するため, 寸法及びプロファイルは極めて高い精度が要求される。このため, 厚肉リングは, セクタ部を一体熱間絞り成形により製作し, 補強リブを設けない構造が採用された。成形は, トーラス円周角度40度を単位として行なわ

れる。

容器の材料は, Ni基超合金のインコネル625相当材である。一体成形方式を実現するために, この合金では世界で初めての, 厚さ65mm, 単位重量3tf以上の厚板が開発され, 大量生産された。厚板は, 内部と表面の欠陥, ヤ金的な品質の確性試験を実施し, いずれも良好な品質を確認した。

溶接構造は, 電子ビーム溶接法を広く適用した設計とした。これは, 一体成形方式の採用と, 大サイズの素材の開発による溶接線の低減とともに, 超高真空度を確保する上で最も重要な溶接部の品質に対し, 大きな信頼性を付与するものである。

容器の支持方式は, ベークと高温運転時の熱膨張を拘束することなく, 耐震特性で問題となる垂直方向の剛性を確保できる特殊な支持構造とした。

製作に際しては構造の大半を占める厚肉リングは, 総型を用いて4分割で成形するとともに, 110kW大出力電子ビーム溶接機で, 65mm板厚を1パスで溶接する方法を採用している。図3に電子ビーム溶接状況を示す。また, 単体許容リーク量 1×10^{-9} Torr l/sの高真空仕様に対応するため, 成形ベローズと厚肉リングの溶接は, 開先加工をNC(数値制御)横中ぐり盤で行なうとともに, 開先追従機構をもつ自動ティグ溶接(TIG溶接: Inert Gas Shielded Tungsten Arc Welding)を適用し, 溶接信頼性の確保を図っている。

3.2 コイル

“JT-60”本体のコイルは, トロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルとに大別される。

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, 中心支柱を中心に18個の単位コイルが20度ピッチで放射状に配置され, 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。“JT-60”では, 真空容器の断面が卵形をしているため, トロイダ

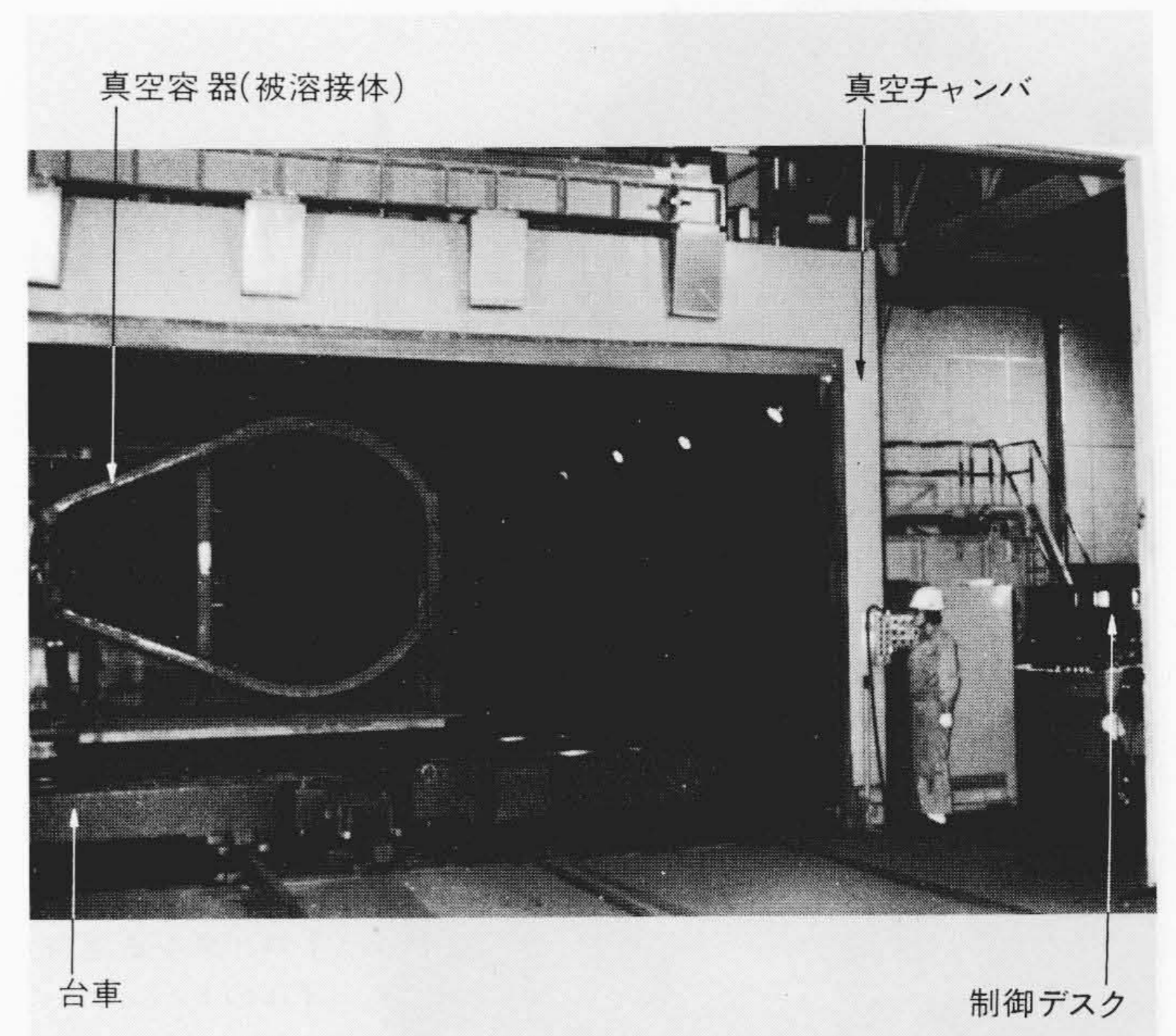


図3 “JT-60”真空容器, 厚肉リングの電子ビーム溶接状況 厚肉リングは総型成形加工した部片を電子ビーム溶接で接合することにより, 高精度に製作された。

ル磁場コイルの配列中心半径は3.32mとなり、プラズマ中心半径よりもかなり大きくなっており、磁気エネルギーは2.8GJと、装置としては同世代の米国のTFTRのトロイダル磁場コイルの磁気エネルギーの約2倍に達する。

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の補強枠の中に収納したものであり、各パンケーキ形コイルは、冷間圧延無酸素銅(半分以上が0.2%銀入り)材をヤ金的に接続した36ターンから構成されている。

本トロイダル磁場コイルには、全体で約10万tfの中心支柱方向の向心力、約30万tfの単位コイルを押し広げようとするフープ力、ポロイダル磁場による転倒力、温度上昇による熱応力などがそれぞれ重畳して印加されるため、有限要素法による詳細な応力解析を行なうとともに、実荷重模擬試験を実施し、その信頼性を確認した。

トロイダル磁場コイルの製作上の特徴として、コイルは約半周ごとに導体を継ぎ合わせパンケーキ状に巻き付けられる。このコイルには、冷却管用の溝が必要であり、あらかじめ直線状態でこれらの溝が切られた導体を、所定の曲率で曲げ加工する。本コイルの接続部は、特に信頼性の高い接続が必要であるため、

- (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) 自動超高波探傷装置の開発による全面検査の実施

などにより、信頼性の高い安定した作業技術を確認し、製作されている。層間絶縁としては、ガラス不織布を両面にもつポリアミド積層シートを採用し、半周ごとにろう付けされたコイル間に挿入される。加熱締付により、寸法精度の高いコイルが製作されている。アース絶縁には、ガラス裏打集成マイカテープを、更に強度を補うために保護としてガラステープが巻き付けられるが、これらはプリプレグ材であり、巻付後一体成型される。成型法として、実績のある求心成型法が採用され、**図4**に示すパンケーキコイルとして仕上げられる。

二つのパンケーキコイルは、一対として補強枠に挿入固定されるが、この材料には特に低透磁率、高強度が要求される

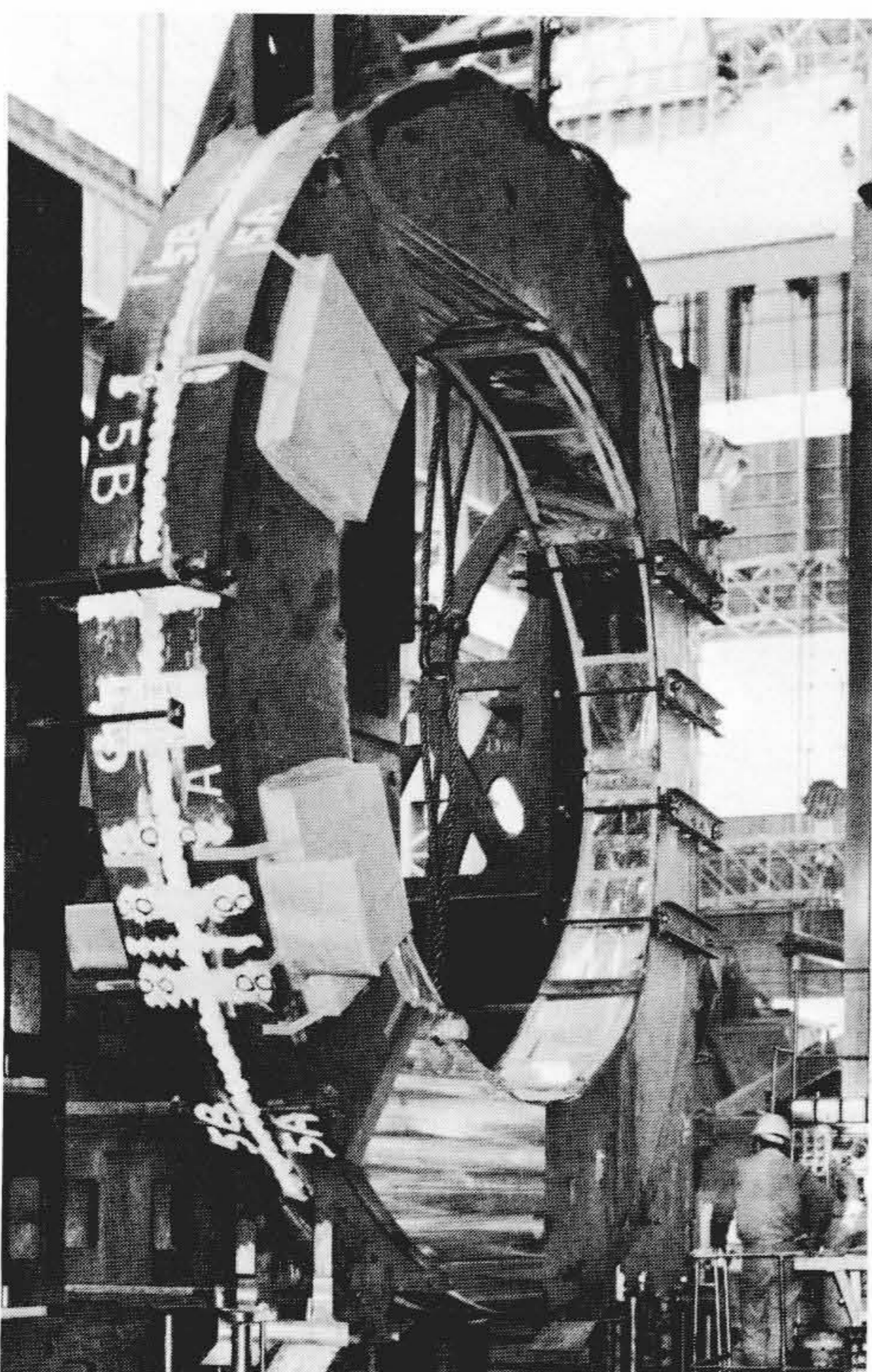


図4 “JT-60”
トロイダル磁場コイルの1パンケーキ
36ターンのパンケーキ状コイルで、
外径は約5.5mに達する。

ため、通常のスチレンス鋼は使用できず高マンガン非磁性材が採用されており、これは高度の難削材である。また加工硬化が著しく、特殊なマッハミルカッタ、超硬トレパニングカッタなど、新工具が開発された。これらのコイルは、一貫ラインで製作される。

3.2.2 ポロイダル磁場コイル

ポロイダル磁場コイルは、プラズマの小円方向の磁界を生じさせ、プラズマの発生、制御を行なうための電流を流す大周方向に巻かれたコイルである。ポロイダル磁場コイルは、真空容器外コイルと真空容器内コイルとに大別される。前者は、空心変流器コイル、垂直磁場コイル、水平磁場コイル及び四重極磁場コイルから成り、また後者は、磁気リミッタコイルから成る。このうち最大の起磁力、最高の使用最高電圧をもつものは空心変流器コイルで、それぞれ5.5MAT、30kVである。

構造上の特徴は、これらのコイルがいずれもトロイダル磁場コイル内部に設けられるため、接続部が必要なこと、狭いスペースで電磁力、熱伸びなどを保持し、また接続などの作業性が考慮されねばならない点である。

製作面では大断面長尺導体の高精度加工、導体の接続及び耐高電圧絶縁に高度の技術が要求される。特に、トロイダル磁場コイルと鎖交を可能にするための分割部の接続は、サイトでの最終組立作業であり、狭隘部で信頼性の高い作業ができるよう手法を確立しておくことが必要である。

3.3 支持構造物

支持構造物は大別して下部構造物、上部構造物、真空容器及び支持柱から成る。下部構造物は装置本体を支持し、その内部にプラズマ計測機器を設置する空間を構成する。上部構造物はトロイダル磁場コイルから発生する強大なねじりモーメントを支持し、トラス状構造物を介して建屋壁面と連結しモーメントを伝達する。真空容器支持柱は、真空容器を独立して支持する構造物である。

これらの構造物は、いずれも巨大な重量と電磁力を支持する大形構造物であるため、繰返し荷重に対する合理的な構造設計と剛性の確保に留意して設計され、裕度の高いものとなっている。特に耐震設計では、動的解析を実施し各部の剛性の協調を図った。また、地震時に建屋壁面へ作用する荷重の均一化を考慮して、油圧式ダンパを設置してある。

支持構造物について従来の核融合装置と対比した場合、最も大きな特徴の一つは、その使用材料である。本装置では、従来広く採用されたオーステナイト系ステンレス鋼に代わっ

表3 各溶接部の継手性能(As Weld) 高マンガン鋼の溶接性の改良、溶接材料の開発及び溶接施工条件の検討により、各種溶接法の継手性能は設計仕様を満足している。

		0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り	vE ₀ (depo)	比透磁率
14Mn鋼	被覆 アーク溶接	34kgf/mm ²	75kgf/mm ²	50%	58%	11kgf·m	<1.01
	ミグ溶接 (MIG溶接)	39kgf/mm ²	65kgf/mm ²	48%	46%	11kgf·m	<1.01
	電子 ビーム溶接	38kgf/mm ²	84kgf/mm ²	47%	53%	20kgf·m	<1.01
18Mn鋼	ミグ溶接 (MIG溶接)	63kgf/mm ²	83kgf/mm ²	40%	47%	8kgf·m	<1.01
	電子 ビーム溶接	59kgf/mm ²	99kgf/mm ²	38%	41%	14kgf·m	<1.01

注：vE₀(0℃における吸収エネルギー)

depo(溶着金属)

ミグ溶接(MIG溶接: Inert Gas Shielded Metal Arc Welding)

て、今回初めて高マンガン系非磁性鋼が全面的に採用された。本鋼種は、Mn 14~18%、C 0.4~0.7%、その他Cr, Niを含む材料であって、鉄鋼メーカーの協力を得て数種類が開発された。いずれもステンレス鋼と比べ高強度、低透磁率であって、磁気特性の冷間加工安定性に優れ、高靱性をもち溶接性の良好な優秀な構成用鋼である。

各種支持構造物は溶接構造を採用するため、材料の開発段階から溶接性を考慮し、不純物P, S及びガス成分N, Oの低減、並びに合金組成の改善を図り、溶接材料の選定及び適正溶接施工条件の検討を行なった結果、健全な溶接継手性能を得ることが可能となった。表3に各種溶接法の継手性能を示す。

溶接に当たっては、溶接変形及び残留応力の少ない電子ビーム溶接を主体とし、ミグ溶接(MIG溶接: Inert Gas Shielded Metal Arc Welding)及び被覆アーク溶接を組み合わせ適用し、溶接部は放射線透過検査、超音波探傷試験及び浸透探傷検査により最大板厚250mmまで非破壊検査を行ない品質保証を図っている。

3.4 真空排気設備

真空排気設備は、真空容器内部の気体を排除し、清浄な超高真空にするための設備である。この設備は、真空排気系、ベーキング系、冷却水系、測定系、圧空系、ガス導入系、液体窒素供給系、計測系及び制御系から構成されている。真空容器との接続は、180度の位置に上下各1箇所、合計4箇所に設けられた公称直径580mmの真空排気ポートによってなされている。本設備の中心となる真空排気系は、主ポンプは公称排気速度3,500l/sのターボ分子ポンプ16台から構成する案で設計が進められており、真空排気ポートの真空容器側で、全体で13,000l/sの排気速度をもつ。

3.5 可動リミッタ

可動リミッタは、プラズマ電流の立上げ時にプラズマ電流の表皮効果を防止するための装置であり、真空容器内のトロイダル位置1箇所の上下に設けられている可動リミッタのリミッタヘッドを高速移動するものである。本装置は、駆動機構、真空シール機構、高温真空軸受、リミッタヘッド、温度制御層及び可動リミッタ架台から構成されており、リミッタヘッド材質にはモリブデンを使用、駆動源には高圧力の油圧サーボを採用し、また、真空シール機構には長連の溶接ペローズを用いている。駆動部重量は約250kgで、ストローク1mを最大10m/s(平均値)で移動する。

4 “JT-60”制御設備の製作

現在日立製作所では“JT-60”、本体の一部をなす本体制御設備と、“JT-60”全設備を統括制御する全系制御設備の設計、製作を進めている。

4.1 “JT-60”制御システムの概要

“JT-60”の制御システムについては、日本原子力研究所の指導のもとに、海外情報も踏まえながら検討がなされてきた。初めに、“JT-60”制御システムに共通する基本的な考え方について以下に述べる。

- (1) 各設備の制御装置と、それを統括制御する全系制御設備による階層構成とする。
- (2) 階層構成の各設備に計算機を配置した分散制御方式とし柔軟性のある制御システムとする。
- (3) 上記階層構成の設備間にまたがるデータ伝送の標準化を図るため、計算機インタフェースとして、CAMAC規格を採用する。
- (4) 保護インタロックは、同じく階層構成とし、ハードワイヤード方式を採用する。

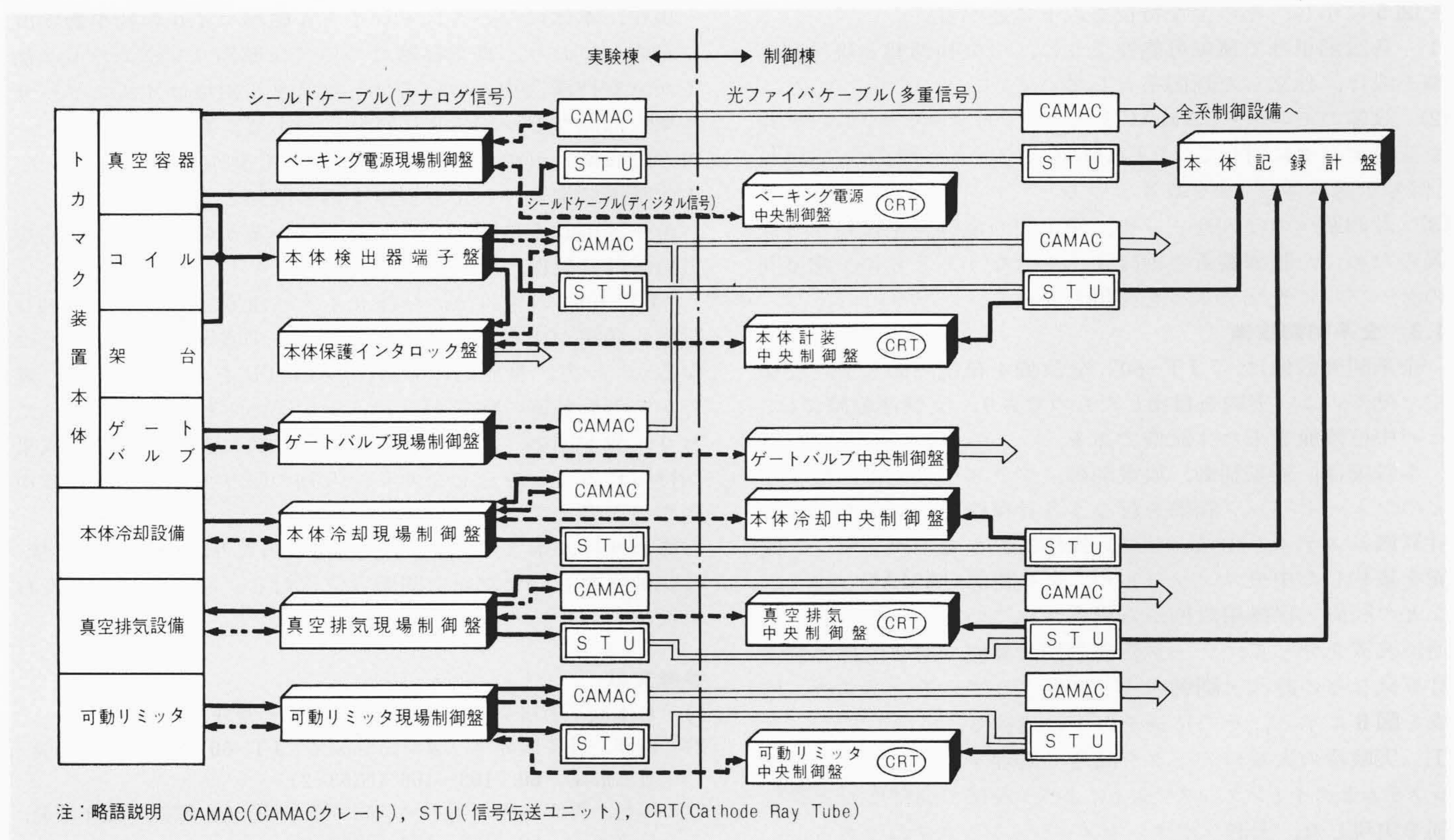


図5 “JT-60”本体制御設備のシステム構成 トカマク装置本体とその付属設備の制御装置で構成され、それぞれ中央制御盤と現場制御盤があり、設備のモニタをCAMACシステムと重要データはSTUで行なう。建屋間の多重信号伝送に光ファイバケーブルを使用している。

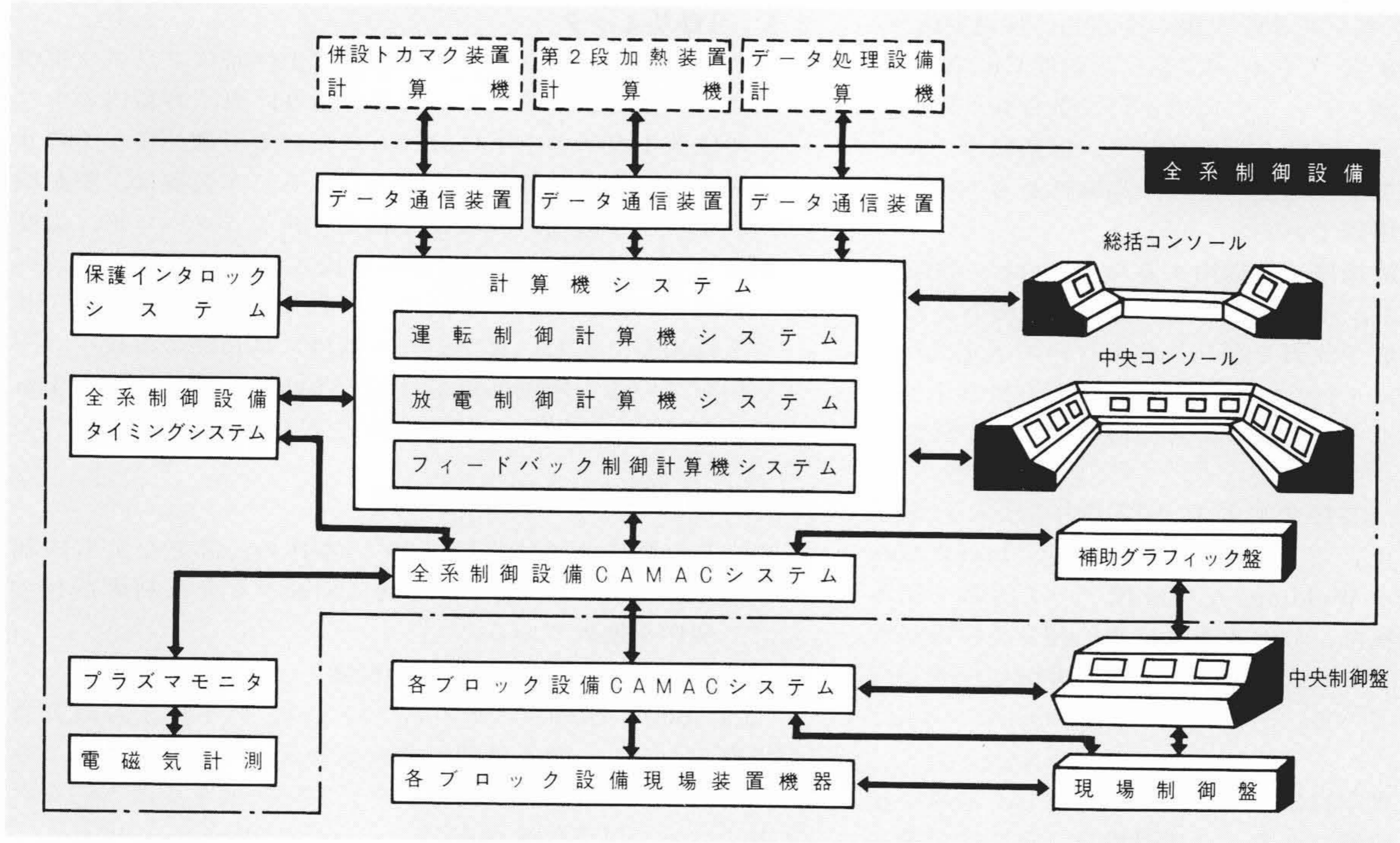


図6 “JT-60” 全系制御設備のシステム構成
 計算機システムを中核としたシステムで、“JT-60”全設備を統括制御し、プラズマ実験の中核機能を果たすために、多数の設備で構成している。

- (5) 実験制御の精度向上と高速シーケンス制御のために、タイミングシステムを設ける。
- (6) 多重信号伝送方式を採用し、また、強電磁場中の耐ノイズ対策として、建屋間の信号伝送には光ファイバケーブルを採用する。

4.2 本体制御設備

本設備は、トカマク装置本体の監視、保護のための本体計装及びその付属設備のベーキング電源、真空排気設備、可動リミッタなどの制御装置で構成されている。システムの構成を図5に示し、その主な特長を以下に述べる。

- (1) 各設備単独で運転可能なように、中央制御盤と現場制御盤を設け、独立した制御系としている。
- (2) 設備のモニタをCAMACシステムで行なうとともに、重要な監視データに対しては、CAMACシステムと独立したSTU(信号伝送ユニット)を設けている。
- (3) 計測系への侵入サージや、建屋間の電位発生に対する保護のために、制御装置の絶縁強化を行なうとともに、建屋間のケーブルに光ファイバを採用している。

4.3 全系制御設備

全系制御設備は、“JT-60”全設備を統括制御して、安全で、効率のよい実験を目指したものであり、実験運転時には、その中核機能を果たす設備である。

本設備は、運転制御、放電制御、プラズマの位置、形状などのフィードバック制御を行なう各計算機システムから成る計算機システムを中核として、操作監視などのマンマシン機能を集約した中央コンソールや、全系制御CAMACシステムなどの制御・保護用設備から構成されている。また、データ通信装置を介して、データ処理設備計算機や第2段加熱装置計算機などの計測・制御設備と結合されている。システム構成を図6に示し、その特長を以下に述べる。

- (1) 実験時の大量のデータを高速で処理するほかに、計算機システムとタイミングシステムとにより、多様で高精度な実験制御を実現した、大形ラボオートメーションシステムである。
- (2) 多数のCRT(Cathode Ray Tube)ディスプレイ装置を配置して、マンマシンコミュニケーションの機能を大幅に向

上するとともに、標準化、ユニット化した中央コンソールを採用して、柔軟性のある運用を可能にしている。

- (3) 計算機システムは、日立制御用計算機HIDIC 80Eを採用し、ロードシェアを基本としたマルチコンピュータシステムで構成し、高性能システムを実現している。

5 結 言

“JT-60”は建設サイトも決定し、昭和54年12月には起工式も挙行され、目下本格的に建設が進められている。

現在、本体についてはトロイダル磁場コイルの約半数が既に完成しており、真空容器については厚肉リングのプレス加工が、支持構造物についてはトロイダル磁場コイルスペーサや架台部品などが順次製作されつつある。真空排気装置、一次冷却設備、可動リミッタなどの設備も製作が進行中であり、本体制御設備についても製作準備の段階となっている。

全系制御設備に関しては、事務的作業が終了し、本格的な実機設計、製作の段階を迎えている。

“JT-60”の建設は、今後サイトの建家工事が進み、残り設備の発注が決定するにつれてますます盛況を迎えることになろう。一方、世界的にも米国のTFTRをはじめとして、幾つかの大形装置の建設が急ピッチで進められることになっており、我が国の“JT-60”の建設が順調に進み、所期の成果が得られることを念じながら、人知の限りの努力を続けてゆきたいと考えている。

終わりに、本プロジェクトの遂行に当たり、種々の御指導、及び御協力をいただいた関係各位に対し、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，1979年
- 2) 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，60，163～166(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，60，167～170(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，60，171～174(昭53-2)